Nick Herbert
a realidade quântica
Francisco Alves

A REALIDADE QUÂNTICA

COLEÇÃO CIÊNCIA

Contando as Eras
No Mundo da Álgebra
No Mundo dos Números Asimov, Isaac

Mente e Natureza
Bateson, Gregory

Interferon - A Nova Esperança Contra o Câncer
Edelhart, Michael/Linderman, Jean

Experiência Matemática, A
Sonho de Descartes, O
Davis, Philip / Hersh, Reuben

inverno Nuclear, O
Ehrlich/Sagan/Kennedy/Roberts

Possibilidades Humanas

Krippner, Stanley

Máquina e seu Avesso, A Leão, Emmanuel Carneiro/Amaral, Mareio Tavares d'/Sodré, Muniz/Doria, Francisco Antonio

Essência da Vida, A
Morowitz, Harold J.

Criança Mágica, A
Evolução da Criança Mágica, A
Pearce, Joseph Chilton

Dragões do Éden, Os
Romance da Ciência, O
Sagan, Carl

Omni Continuum
Teresi, Dick

Sexo entre os Animais, O

Wallace, Robert A.

A Realidade Quântica
Nick Herbert

Nick Herbert

A REALIDADE QUÂNTICA

NOS CONFINS DA NOVA FÍSICA

Tradução
Mário C Moura

Contracapa

A Realidade Quântica: nos confins da nova Física

"Nick Herbert, com infinito esmero e paciência, aborda a questão da realidade à luz difusa da teoria quântica e do teorema de Bell. Preparem-se para um passeio de montanha-russa que levará suas mentes ao limite da distensão e os deixará ofegantes. Dentre as questões possíveis, a mais profunda é, afinal, 'O que éΔ' A mais profunda das respostas possíveis poderá ser 'O que é, não é?' "

Isaac Asimov

Orelhas

A teoria quântica - já firmemente estabelecida como base da Física - comemorou em 1985 o seu sexagésimo aniversário. Contudo, a despeito do seu enorme sucesso prático, os físicos discordam profundamente a respeito da real significação dessa teoria. Consequentemente, se sentem incapazes de dizer qual o tipo de realidade em que se apoia o mundo cotidiano. O que sabemos, realmente, sobre a natureza do mundoΔ

Em A realidade quântica, o proeminente físico Nick Herbert criou um trabalho-chave que penetra mais profundamente no assunto do que os reconhecidos clássicos nesse campo, The Tao of Physics, de Capra, e The Dancing Wu Li Masters, de Zukav. O Dr. Herbert aborda a antiquíssima questão "O que é realidade?" explicando e, em seguida, utilizando as descobertas e teorias da Física moderna, em particular o Teorema de Bell, do qual se revela um magistral e

original expositor. Neste texto fascinante, acessível aos leigos e estimulante para os físicos, o Dr. Herbert descreve as principais realidades que os físicos geralmente consideram como a "realidade real" encoberta pelas aparências — a interpretação de Copenhague (não existe nenhuma realidade profunda), a interpretação do Universo Múltiplo (existem trilhões de realidades paralelas), e outras igualmente bizarras. Escrito de maneira clara e concisa, intercalado por dúzias de desenhos a traço, o presente livro desvenda, como nunca antes se fez, o mundo subatômico do quantum

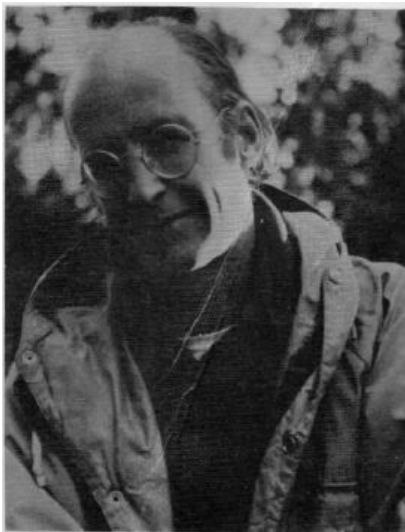



Foto: Kohla S. Herbert

Nick Herbert é consultor para assuntos relacionados à Física; tem produzido numerosas publicações sobre a teoria do quantum e proferido dezenas de conferências sobre a natureza da realidade quântica, dirigidas a um público não especializado.

Sumário

A meu pai

Prefácio

Um dos aspectos curiosos da física moderna é que, a despeito do esmagador sucesso prático obtido na explicação de uma vasta gama de fenômenos físicos, do quark ao quasar, ela não consegue nos fornecer uma única metáfora compatível com a maneira pela qual o universo realmente funciona. A antiga metáfora mecânica, "O mundo é um gigantesco relógio", reuniu numa só imagem os principais aspectos da física newtoniana — a saber: atomicidade, objetividade e determinismo. No entanto, os físicos de hoje não possuem qualquer metáfora que englobe numa única imagem as características principais da teoria quântica. O mais importante objetivo de *A realidade quântica* é o de examinar as várias imagens do mundo, ensaiadas e propostas pelos físicos do quantum.

A busca de uma figuração do "modo de ser do universo" transcende os estreitos interesses dos físicos teóricos. Certo ou errado, o homem sempre procurou organizar as suas estruturas domésticas, sociais e políticas de acordo com a visão dominante da realidade física. Inevitavelmente, a visão cósmica atinge os menores detalhes materiais da vida cotidiana.

No decorrer da Idade Média, quando virtualmente todos viam o mundo como a criação pessoal de um ser divino, a sociedade refletia a hierarquia que se supunha existir no mundo celestial.

A imagem do mundo, criada por Dante como uma série de esferas concêntricas — o céu, a maior; em seguida, a esfera cristalina dos planetas; mais abaixo, os "elementos" concêntricos da nossa Terra; e o conjunto sustentado pelos sete círculos do inferno — conferia a tudo e a todos um lugar próprio no esquema medieval das coisas, desde o direito divino dos reis até à

obediência abjeta do mais inferior dos servos. A maioria das pessoas aceitava passivamente essa estrutura hierárquica porque ela representava o modo de ser do universo.

A revolução newtoniana fez cair o reinado das esferas de cristal, substituindo-o pela física da matéria comum, governada por leis matemáticas, e não por comando divino. Com o surgimento da física newtoniana, verificou-se a ascensão da democracia moderna, que dá ênfase a um "reinado das leis e não dos homens", e pressupõe uma igualdade teórica entre as peças da maquinaria social. A Declaração de Independência, por exemplo, na frase "Consideramos estas verdades evidentes por si mesmas", soa mais como um teorema matemático do que um documento político. Do mesmo modo, o mecanismo igualitário que Newton descobriu nos céus insinuou-se em todos os aspectos da vida ordinária. Certos ou errados, vivemos hoje em um mundo amplamente mecanicista.

Da mesma forma que Newton estilhaçou as esferas medievais de cristal, a moderna teoria do quantum danificou, de maneira irreparável, o mecanismo de relojoaria de Newton. Estamos hoje convencidos de que o mundo *não é* um mecanismo determinista. Porém, não somos capazes de dizer, em verdade, o que o mundo *é*. A busca da realidade quântica é a busca de uma imagem única, que seja consistente com nossos novos conhecimentos do modo pelo qual o mundo realmente funciona.

Muitos aspectos da teoria quântica são do conhecimento público, tais como a noção de que todos os eventos elementares ocorrem aleatoriamente, governados apenas por leis estatísticas; que existe um "acontecimento mínimo" — a constante irredutível de ação, de Max Planck; e que o famoso princípio da incerteza, de Heisenberg, torna impossível um conhecimento preciso da posição e da quantidade de movimento de uma partícula quântica. Uma re-

alidade quântica aceitável deveria incorporar esse conhecimento, e muito mais, numa única e ampla metáfora que traduzisse o modo de ser do universo.

Meu primeiro encontro com a questão da realidade quântica se deu na Universidade, quando aprendi a descrever o comportamento dos átomos, das moléculas e das partículas elementares, utilizando a linguagem matemática da teoria quântica. Essa teoria possui a peculiaridade de descrever, de maneiras diversas, um *átomo medido* e um *átomo não medido.*

O átomo medido possui, sempre, valores definidos para os seus atributos (tais como posição e quantidade de movimento), o que nunca acontece com o átomo não medido. Todo átomo deste mundo, que não esteja sendo medido no momento, possui (pelo menos na descrição matemática) não apenas um valor para cada um dos seus atributos, e sim todos os valores possíveis, assemelhando-se, de certo modo, a um re-

ceptor de TV defeituoso, que mostrasse, simultaneamente, todos os seus canais.

Naturalmente, eu me perguntava que tipo de realidade aquele estranho simbolismo do mundo não medido realmente significava. Os atributos dos átomos não medidos teriam uma multiplicidade de valores? Seriam imprecisos? Não existiriam? Ou simplesmente seriam desconhecidos?

No entanto, quando eu perguntava aos meus professores o que realmente significava a teoria quântica — i.e., qual seria *a realidade* encoberta pela matemática — eles me diziam que, para um físico, não tem sentido a formulação de perguntas sobre a realidade. Advertiam-me que seria melhor aferrar-me à matemática e aos fatos experimentais e parar de me preocupar com o que acontecia nos bastidores. Ninguém expressou melhor a relutância dos físicos para lidarem com a realidade quântica do que Richard Feynman, do Instituto de Tecnolo-

gia da Califórnia, agraciado com o prêmio Nobel: "Penso que se pode afirmar, com segurança, que ninguém entende a mecânica quântica. Caso consiga evitar, não fique se perguntando 'mas como pode ser assim?' porque isso será perda de tempo e o levará a penetrar num beco escuro, de onde ninguém até hoje conseguiu escapar. Ninguém sabe como pode ela ser assim."

Apenas para ter *algo* em mente, enquanto efetuava cálculos quânticos, eu imaginava que um átomo sempre possuía valores definidos para todos os seus atributos (como qualquer objeto comum), quer se tratasse ou não de um átomo medido. Contudo, o processo de medição perturba tão profundamente o átomo que os seus atributos medidos guardam apenas uma relação estatística com os seus atributos não medidos. Convenci-me que um tal "modelo de perturbação" da medida poderia justificar o comportamento aleatório do átomo, as relações de incerteza de Heisenberg, e outros mistérios

do quantum. Nesse quadro de "perturbação", a posição e a quantidade de movimento *reais* de um átomo são sempre definidas, porém, geralmente, desconhecidas; a sua posição e quantidade de movimento *medidas* não podem ser acuradamente previstas porque o dispositivo de medição altera, necessariamente, aquilo que mede.

Minha crença nesse modelo de perturbação da realidade ficou reforçada quando tomei conhecimento de que Werner Heisenberg, quando jovem, defendera uma visão semelhante do mundo quântico. Não me ocorreu questionar a razão pela qual Heisenberg logo descartou uma tão óbvia explicação, para adotar a interpretação de Copenhague, mais obscura e mística, endossada pela maioria dos físicos de hoje.

Resumidamente, a interpretação de Copenhague afirma que, em certo sentido, o átomo não medido não é real: seus atributos são criados ou realizados no ato da medição.

Eu via a interpretação de Copenhague como pura mistificação, quando confrontada com a clareza e o bom senso do meu modelo de perturbação. Feliz e ignorante dos temas reais que envolvem a questão da realidade quântica, graduei-me e prossegui na minha carreira de físico industrial e teórico.

No verão de 1970, meu amigo Heinz Pageis, físico da Universidade Rockefeller, mostrou-me um trabalho publicado num jornal novo e pouco conhecido. "Aqui está algo estranho que deve interessá-lo, Nick", disse ele. Essa coisa estranha e nova era o teorema de Bell, uma prova matemática que estabelece rígidas condições para qualquer modelo da realidade, quântica ou não.

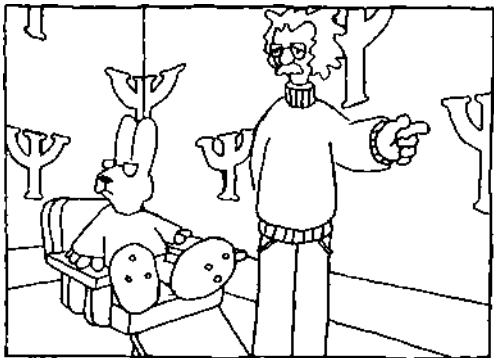
O Teorema de Bell é fácil de entender, porém difícil de acreditar. Ele diz que a *realidade não deve ser local.* "Não local", nos termos do meu modelo de perturbação, significa que os atributos medidos do átomo são determinados

não apenas pelos eventos que estão ocorrendo no local explícito da medição, mas também por eventos arbitrariamente distantes, incluídos os que ocorrem fora do cone de luz — isto é, eventos tão afastados que, para alcançar o local da medição, sua influência precisa propagar-se mais rapidamente do que a luz. Em outras palavras, quando investigo a quantidade de movimento de um átomo, utilizando um instrumento de medida específico para esse fim, a real quantidade de movimento do átomo é perturbada, segundo o Teorema de Bell, não só pelo instrumento utilizado, mas também por uma vasta gama de eventos distantes — eventos que estão ocorrendo, no momento da medição, em outras cidades, em outros países, e possivelmente em outras galáxias. De acordo com John Bell, o ato de medir não é um ato privado, e sim um acontecimento público, de cujos pormenores participam, instantaneamente, grandes porções do universo.

O Teorema de Bell é uma prova matemática, e não uma conjectura ou suposição. Isto é, uma vez aceitas umas poucas e simples premissas, a conclusão certamente decorrerá. Assim, o que Bell faz não é meramente admitir ou sugerir que a realidade é não local; ele de fato prova essa afirmação.

O Teorema de Bell contribuiu imensamente para esclarecer a questão da realidade quântica. Sabemos agora, por exemplo, sem sombra de dúvida, que nenhum modelo local (tal como o meu ingênuo modelo de perturbação) pode explicar os fatos do mundo quântico. O Teorema de Bell trouxe consequências importantes, que afetaram todos os modelos da realidade quântica, inclusive a interpretação de Copenhague, e seus efeitos continuam repercutindo nos círculos físicos. O presente livro explora as diversas realidades quânticas (modelos do mundo consistentes com a teoria quântica) à luz da importante descoberta feita por Bell.

Muitas pessoas ajudaram-me na busca da realidade quântica, tanto através de seus livros e artigos como mediante contato pessoal. Posso mencionar apenas alguns, mas sou grato a todos.

Gostaria de honrar a memória de Randy Hamm, meu amigo e talentoso animador, cuja colaboração na feitura de um desenho animado inacabado, denominado *Benjamin Bunny Faces Reality*, que explora alguns dos conceitos presentes neste livro, deu-me a inspiração para pensar em novos caminhos.

Um dos quadrinhos do desenho animado *Benjamin Bunny Faces Reality*. O "Professor" prepara Benjamin para um teste de realidade.

Gostaria de agradecer a Mike e Dulce Murphy por terem franqueado o Instituto Esalen, em Big Sur, para a realização de seminários de física sobre a realidade quântica. Muito obrigado, também, aos numerosos participantes das conferências realizadas em Esalen, especialmente a Henry Stapp, Saul-Paul Sirag, John Clauser, David Finkelstein, John Cramer,

Larry Bartell, H. Dieter Zeh e Bernard d'Espagnat, de quem recebi muitos esclarecimentos concernentes aos mistérios do quantum.

Agradeço a Charles Brandon e a The Reality Foundation pelo apoio e por uma oportuna doação de gráficos, a Lynn Miller pelas ilustrações cheias de talento, a Shirlee e David Byrd pela assistência editorial e a Phil Pochoda, Dave Barbor e Chaucy Bennetts, da Doubleday, por sua paciência e bons conselhos.

Muito obrigado a minha esposa Betsy e a meu filho Khola por me manterem desperto e atento para outras extraordinárias realidades.

A Busca da Realidade

> O ponto importante numa ciência não é o complicado formalismo matemático, nem a experimentação ritualística. Ao contrário, o coração da ciência é uma espécie de honestidade vivaz que advém de se querer realmente saber que diabo está acontecendo!
>
> Saul-Paul Sirag

Quando eu tinha seis anos, meus pais me deram uma coleção de livros infantis — quatorze volumes de histórias, jogos e canções, encadernados nas cores laranja, preta e dourada. O volume 12 era o de *ciência,* o único sem texto, contendo dúzias de fotografias em preto e branco de grandes máquinas e fenômenos naturais incomuns. Uma das figuras fascinava-me particularmente; ainda hoje, a sua recordação me faz estremecer. A figura mostrava um ninho de ovos, mas o que saía deles eram filhotes de cobras.

Essa foto perturbadora condensava, numa só

imagem, os meus vagos temores de que, sob a superfície das coisas comuns, se esconde uma totalmente estranha (e provavelmente sinistra) realidade.

Muitos anos mais tarde experimentei a mesma sensação — uma súbita revelação de que o mundo não é o que parece ser — provocada, não por uma figura de um livro infantil, mas por um raciocínio matemático publicado num jornal de física: o Teorema de Bell. Esse teorema é uma demonstração simples, porém poderosa, da estrutura da realidade física, e teve em minha mente o mesmo efeito daquele ninho de cobras. O Teorema de Bell é uma das mais reveladoras janelas que os físicos possuem, voltada para a natureza da realidade profunda. Convido o leitor a olhar, também, no Capítulo 12, através dessa janela.

Os físicos estão interessados em saber como o mundo foi formado — a partir de que tipo de objetos básicos, agindo uns sobre os outros

mediante que tipos de forças básicas? A física teve início na antiguidade como uma espécie de história natural; um museu popular de maravilhas inexplicadas e fatos singulares dispostos ao acaso; o mundo sob a forma de conhecimentos desordenadamente acumulados, a observação direta misturada a um fantástico filme de viagens, a bestiários medievais e receitas alquímicas.

Galileu, Newton e outros filósofos da natureza descobriram, no século XVII, que um enorme conjunto de fatos físicos podia ser abrangido por umas poucas fórmulas matemáticas. Com apenas três leis matemáticas, por exemplo, Newton conseguiu explicar todos os movimentos que ocorrem no céu e na terra. Como podia a matemática, desenvolvida primordialmente para anotar as transações comerciais humanas, ter algo a ver com o modo de funcionamento do mundo não humano? Eugene Wigner, agraciado com o prêmio Nobel, se refere

a esse encontro mágico da matemática humana com os fatos não humanos como "a irracional eficácia da matemática nas ciências naturais". "Essa eficácia irracional", diz Wigner, "é uma dádiva maravilhosa, que não entendemos nem merecemos."

Embora a matemática seja originária da mente humana, a sua notável eficácia para descrever o mundo não se estende à mente em si. A psicologia tem se mostrado extraordinariamente resistente à matematização que tão bem funciona na física.

O filósofo alemão Immanuel Kant ficou profundamente impressionado com o método matemático de Newton e procurou explicar o êxito de sua aplicação, bem como entender as suas limitações. Kant iniciou sua análise dividindo o conhecimento em três partes: aparência, realidade e teoria. A aparência é o conteúdo de nossa experimentação sensorial direta dos fenômenos naturais. A realidade (Kant

denominava-a "a coisa em si") é o que se oculta atrás de todos os fenômenos. A teoria é formada de conceitos humanos que tentam refletir tanto a aparência quanto a realidade.

Kant acreditava que as aparências do mundo estavam profundamente condicionadas pela aparelhagem intelectual e sensorial humana. Outros seres indubitavelmente experimentam o mundo de modos radicalmente diferentes. Os fatos científicos — as aparências propriamente ditas — são tanto um produto da natureza humana do observador, quanto o de uma realidade subjacente. Vemos o mundo através de óculos protetores especificamente humanos, Kant era de opinião que a participação da natureza humana na criação das aparências explicava tanto a notável eficácia dos conceitos humanos para interpretar os fatos, quanto os limites naturais dessa mesma eficácia.

Fig. 1.1. Pesquisador da realidade do século XVIII,
Immanuel Kant procurou definir os limites extremos
do conhecimento humano.

Segundo Kant, nossos conceitos parecem concordar com os fatos porque ambos possuem

uma origem comum — a condição humana. Enquanto a natureza humana estiver entrelaçada com as aparências, os conceitos humanos serão eficazes para explicá-las. Podemos explicar somente aqueles aspectos do mundo que lhe foram atribuídos por nós mesmos; por isso a natureza da realidade profunda permanecerá para sempre inacessível. O homem está destinado a conhecer tão-somente, seja diretamente ou através da conceituação, as aparências do mundo e, dentre estas, apenas aquelas que têm origem humana.

A posição de Kant é um exemplo da face pessimista da pesquisa da realidade, que pode ser expressa da seguinte maneira: o equipamento sensorial e intelectual humano desenvolveu-se num contexto biológico voltado principalmente para a sobrevivência e reprodução da humanidade. As faculdades que esses animais inteligentes podem ter são inteiramente inadequadas para formar uma imagem da realidade

em si, a qual pertence a uma outra ordem que transcende de maneira absoluta nossas preocupações triviais.

Por outro lado, os pesquisadores da realidade, de tendência otimista, argumentam que, sendo os seres humanos parte da natureza — portanto naturais até o âmago —, nada os impede de sentir ou conceituar a realidade em si. Na verdade algumas de nossas experiências e/ou ideias podem já estar em contato com o próprio núcleo da realidade.

Além da distinção otimista/pessimista, outra diferença separa os pesquisadores da natureza da realidade: a divisão pragmatista/realista. O pragmatista acredita somente nos fatos e na matemática e, em princípio, recusa qualquer especulação sobre a realidade profunda, sendo tais questões, no seu ponto de vista, destituídas de sentido. O renomado físico e astrônomo Sir James Jeans assim resume a orientação pragmática: "A verdade final acerca de um fenôme-

no reside em sua descrição matemática; desde que não exista qualquer imperfeição nessa descrição, nosso conhecimento do fenômeno será completo. Somente por nossa conta e risco iremos além da fórmula matemática; podemos encontrar um modelo ou imagem que nos possa ajudar a entendê-la, mas não devemos contar com isso, e a eventualidade de não encontrarmos um tal modelo ou imagem não indica, necessariamente, que haja erro em nosso raciocínio ou conhecimento. A construção de modelos ou imagens para explicar as fórmulas matemáticas e os fenômenos que elas descrevem não constitui um passo na direção da realidade, mas, ao contrário, na direção oposta; é como fazer a gravura de um espírito."

O realista, por outro lado, acredita que uma boa teoria explica os fatos porque faz contato com a realidade que jaz atrás desses fatos. O principal objetivo da ciência, segundo os realistas, é ultrapassar tanto os fatos quanto a teo-

ria e chegar à realidade subjacente. Como disse Einstein, o mais famoso de todos os realistas: "É com a realidade que a física realmente lida."

O pragmatista trata sua teoria como se ela fosse um *livro de receitas,* útil para encomenda e manipulação dos fatos. O realista vê a teoria como um *guia de viagens* que mostra ao viajante os pontos culminantes da paisagem invisível que jaz logo abaixo dos fatos.

Quase todos os físicos são uma mistura complexa de pragmatistas e realistas, ao mesmo tempo otimistas e pessimistas quanto às suas chances de estabelecer um firme contato com a realidade profunda. Como muitos outros empreendimentos humanos, a prática da ciência requer um ponto de equilíbrio que se move constantemente entre dois extremos, uma sensibilidade voltada para o meio-termo, assim definido pelo pesquisador experimentalista francês Jean Perrin: "entre os instintos de prudência e ousadia necessários ao lento progresso da ci-

ência humana”.

Não quero me tornar dogmático a respeito do que pode ser entendido como "realidade em si", a fim de não enredar nossa pesquisa em preconceitos desnecessários. Da mesma forma que a solução final de um quebra-cabeça ou criptograma, o contato com a realidade profunda traz consigo, de modo indubitável, a confirmação de sua validade: reconhecê-la-emos quando a virmos. Contudo, como ilustração dos tipos de realidade que podemos estar procurando na física, relembro aqui dois relatos históricos: o de uma realidade que falhou e o de uma outra que deu certo.

O ÉTER LUMINÍFERO

Em 1864, o físico escocês James Clerk Maxwell descobriu as equações básicas que regem a eletricidade e o magnetismo. Para surpresa de todos, esses fenômenos se revelaram como sendo dois aspectos de uma só entidade: o campo eletromagnético. Hoje, os físicos pro-

curam uma maneira de unificar todos os campos da natureza. Maxwell foi o primeiro físico a mostrar que a tarefa de unificação dos campos não seria uma futilidade.

O bônus teórico que Maxwell colheu dessa fusão de dois campos num só foi a descoberta de que as ondas, nesse seu campo eletromagnético, se propagavam com a mesma velocidade da propagação da luz. Com base nessa coincidência numérica, Maxwell presumiu que a luz seria, na realidade, uma vibração eletromagnética de frequência especial. Os experimentos de Heinrich Hertz sobre a radiação eletromagnética de baixa frequência (ondas de rádio) que era, em todos os aspectos, exceto a frequência, idênticas à luz, confirmaram a audaciosa suposição de Maxwell.

Todas as ondas conhecidas vibram em algum meio (tal como ar ou água). O meio no qual a luz presumidamente se propaga foi apelidado de "éter luminífero". Os físicos do final

do século XIX deram alta prioridade à pesquisa das propriedades mecânicas do éter. Maxwell descreveu o alvo dessa pesquisa com as seguintes palavras: "Sejam quais forem as dificuldades que podemos encontrar na formulação de uma ideia capaz de descrever a constituição do éter, não pode haver dúvida de que os espaços interplanetários e interestelares não são vazios e estão ocupados por uma substância ou corpo material que certamente é o maior e provavelmente o mais uniforme corpo de que temos conhecimento."

A partir das bem conhecidas propriedades da luz poder-se-ia inferir muitas dessas hipotéticas propriedades do éter. Por exemplo: considerando que a luz caminha tão rapidamente, a elasticidade do éter deveria ser enorme, milhões de vezes mais resiliente do que a mais resistente mola de aço imaginável. Como a luz é uma onda transversa — vibra para os lados e não para a frente e para trás — o éter deveria

ser sólido. Os gases e os líquidos podem suportar apenas vibrações para frente e para trás (o som é um exemplo), enquanto que os sólidos transmitem os dois tipos de vibração (as ondas sísmicas, por exemplo, vibram em todas as direções). O fato de que a luz vibra apenas lateralmente (nenhuma onda luminosa longitudinal foi jamais observada) necessitaria ser explicado através de estruturas complexas do éter, que suprimissem de uma vez por todas a natural vibração longitudinal, mas permitissem vibrações laterais propagando-se com extrema rapidez.

Embora uma espécie de "vidro" transparente, mais duro do que o aço, preenchesse todo o universo, esse vidro não oferecia a mais insignificante resistência à passagem dos corpos materiais. O movimento da Terra não parecia ser afetado pela presença do éter luminífero. Alguns físicos sugeriram que o éter poderia se comportar como um sólido para movimen-

tos rápidos como o da luz, e como um fluido para movimentos lentos como o dos planetas, de maneira semelhante à de certos sólidos de constituição cerácea, cuja viscosidade depende da velocidade da deformação. Em termos atuais, uma tal hipótese equivaleria a dizer que o universo estivesse ocupado, de ponta a ponta, por alguma massinha semelhante ao Silly Putty.

Em 1887, dois físicos americanos efetuaram uma experiência simples cujo objetivo era determinar a velocidade do deslocamento da Terra através desse onipresente sólido em vibração. Albert Abraham Michelson e Edward Williams Morley montaram uma espécie de pista-de-corrida ótica, utilizando espelhos paralelos, para contrapor as velocidades de dois raios de luz, deslocando-se o primeiro na direção norte-sul e o segundo na direção Leste-Oeste. Dependendo da direção do "vento etéreo" um desses dois raios de luz levaria vantagem so-

bre o outro e certamente venceria a corrida. O resultado da experiência de Michelson-Morley mostrou que os dois raios de luz sempre cruzavam juntos a linha de chegada, num empate perfeito. A despeito da enorme velocidade com que a Terra se desloca no espaço — uma velocidade cuja direção varia continuamente durante o ano — os dois pesquisadores não conseguiram detectar qualquer deslocamento do éter luminífero em relação á Terra.

0 insucesso de Michelson e Morley na detecção do "vento etéreo" levou os físicos a sugerir que os corpos de grande massa, tais como a Terra, capturam o éter e o arrastam consigo em seu movimento. Porém, as tentativas realizadas em laboratório para detectar esse "arrastamento" do éter nas proximidades de corpos maciços em movimento de rotação resultaram infrutíferas. Esse aprisionamento do éter deveria, também, mascarar a posição aparente das estrelas afastadas, efeito este claramente ine-

xistente.

Para explicar o insucesso de Michelson e Morley em sua tentativa de revelar a existência de um "vento etéreo", foram considerados outros efeitos ainda mais despropositados. Os físicos Hendrik Antoon Lorentz, holandês, e George Francis Fitzgerald, irlandês, independentemente um do outro, sugeriram que o deslocamento dos corpos físicos através do éter provocaria uma pequeníssima contração desses corpos na direção do movimento. A contração proposta por Lorentz e Fitzgerald — uma espécie de "aperto" exercido pelo éter — não podia ser observada diretamente, porque as réguas de medida também, supostamente, encolhiam quando orientadas na direção do "vento etéreo". A única função da contração de Lorentz-Fitzgerald era equilibrar as diferenças presentes na pista-de-corrida ótica de Michelson-Morley: o raio de luz que deveria ter perdido a corrida estaria, em virtude da contração de

Lorentz-Fitzgerald, percorrendo um trajeto mais curto, e, consequentemente, os dois raios alcançariam a linha de chegada precisamente no mesmo instante. Esse hipotético "aperto etéreo" constituía uma tentativa desesperada para salvar as aparências, atribuindo ao já sobrecarregado e estranho éter mais uma propriedade incomum.

Embora as propriedades do éter se tornassem mais absurdas a cada investigação, a sua existência nunca era posta em dúvida. Um dos mais notáveis físicos da Inglaterra, o eminente William Thomson, Lord Kelvin, poucos anos após a realização da experiência de Michelson-Morley, expressou a postura geral dos físicos, quando declarou: "De uma coisa estamos certos, e essa coisa é a realidade e substancialidade do éter luminífero".

Não obstante a forte crença dos físicos na existência do éter luminífero, poucos anos após a profissão-de-fé expressa por Lord Kelvin, o

éter foi varrido para o depósito de lixo dos conceitos físicos obsoletos, juntando-se ao flogisto, ao calórico, e à lendária pedra filosofal.

Albert Einstein, um desconhecido funcionário do serviço de registro de patentes de Zurique, publicou, em 1905, uma nova teoria sobre o espaço e o tempo que veio a chamar-se teoria especial da relatividade. A pedra angular da teoria de Einstein consistia em que somente os movimentos *relativos* possuíam significado para as leis básicas da física. De acordo com Einstein, não existe meio físico algum, através do qual se possa observar o movimento *absoluto* de um corpo que se desloca no espaço.

Essa inocente afirmação de Einstein deu origem a profundas consequências no campo experimental. Por exemplo: dois observadores em movimento relativo obteriam resultados diversos na determinação das posições e dos tempos de uma mesma sequência de eventos. Para Einstein, tempo e espaço são conceitos *relati-*

vos, diferentes para cada observador. Outra importante consequência da relatividade é a famosa relação $E = mc^2$, segundo a qual a massa de um objeto equivale a uma certa quantidade de energia, mediante um enorme fator de conversão: o quadrado da velocidade da luz. Embora o espaço, o tempo e o movimento constituam conceitos relativos na teoria de Einstein, outras grandezas físicas são absolutas, isto é, são as mesmas para qualquer observador. A mais importante percepção de Einstein, e que constitui a chave da teoria da relatividade, é a de que todas as leis da física somente terão validade quando construídas a partir daquelas grandezas absolutas. Só assim, essas leis poderão ser as mesmas para todos os observadores.

Uma das grandezas absolutas de Einstein é a velocidade da luz: ela é a mesma, tanto para um observador localizado em Marte, quanto para um outro, localizado na Terra. Outra constante einsteiniana é o chamado *intervalo*

espaço-tempo. Embora o espaço e o tempo não sejam, por si sós, os mesmos para cada observador, uma certa combinação matemática de espaço e tempo, formulada de modo que as alterações do espaço anulem as alterações do tempo, será a mesma para todos os observadores. A ligação relativista entre o tempo e espaço, traduzida na invariância do intervalo espaço-tempo, dá origem à noção de que a realidade do mundo é quadridimensional, com três dimensões espaciais e uma no tempo. O intervalo espaço-tempo é uma espécie de "distância" nesse espaço a quatro dimensões.

Segundo Einstein, somente as grandezas absolutas podem ser utilizadas como ingredientes de uma lei física legítima. As leis formuladas de acordo com as especificações de Einstein são denominadas "covariantes". Sabemos hoje, com certeza, que uma teoria física que não possua uma formulação covariante não poderá representar os fatos. Pela simples pesquisa

do ponto em que ela deixa de ser covariante, ou seja, onde foi utilizado um conceito relativo, ao invés de um conceito absoluto, pode-se mesmo prever com exatidão a maneira pela qual a teoria irá fracassar.

O éter luminífero — um corpo que está imóvel no espaço — é manifestamente um conceito não covariante porque ele está imóvel apenas para um observador. De acordo com Einstein, a física que rege a interação de dois corpos A e 6 só pode depender do movimento relativo desses corpos, e não de suas velocidades medidas pela aferição a um sistema de referência particular. Se a teoria de Einstein está correta — e ela tem sido amplamente confirmada — o conceito do éter jamais poderá ser introduzido em qualquer lei física correta. O éter é um conceito literalmente inútil para a física. Embora as ondas luminosas cruzem o espaço — sendo o modo de propagação da luz, ainda, um mistério — elas não o fazem através de

um meio formado de algum Silly Putty invisível que preencha todo o universo.

A despeito do seu importante papel na ciência vitoriana, não há mais lugar para o éter luminífero na física moderna. O éter foi uma realidade que não deu certo. Consideraremos, a seguir, uma realidade que deu certo: a noção de que a matéria é formada a partir de átomos.

A ideia de que o mundo é constituído de partículas padronizadas originou-se na antiguidade. Seria difícil encontrar outra afirmação mais eloquente da hipótese atômica do que a de Demócrito de Abdera, expressa aproximadamente no ano 500 a.C.: "Ácido por convenção, doce por convenção, colorido por convenção; na realidade, nada mais do que os Átomos e o Vazio."

A hipótese atômica conviveu lado a lado com a crença de que o mundo era formado pelas transformações de uma única substância contínua, por alguns denominada "Fogo", por

outros, "Ar" ou "Água". A observação comum de que a água podia adquirir aspecto sólido, líquido ou gasoso, dependendo da temperatura, era tomada como exemplo de uma substância contínua que podia ser capaz de simular a enorme variedade presente no mundo. Contudo, até o século XIX, os argumentos a favor, tanto da hipótese contínua quanto da hipótese atômica, eram preponderantemente retóricos; poucas eram as evidências que confirmavam um ou outro ponto de vista.

Em 1808, o químico britânico John Dalton descobriu que as substâncias químicas se combinam segundo uma proporção fixa — uma parte de oxigênio, por exemplo, combina com duas partes de hidrogênio para formar a água, desde que se atribua a cada parte um peso-padrão. O peso padrão do oxigênio é dezesseis vezes maior do que o do hidrogênio. Dalton sugeriu a hipótese de que essas proporções fixas refletiriam a combinação de átomos reais,

cujos pesos atômicos seriam proporcionais aos pesos-padrões. De acordo com Dalton, as porções de hidrogênio e oxigênio que se combinam para formar a água obedecem à proporção dois para um porque a água é, na realidade, composta de dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio. Dalton tomou essas proporções químicas constantes como indícios de uma realidade atômica invisível.

Os cientistas, em sua maioria, reconheceram os argumentos de Dalton, e aceitaram a existência real do átomo como explicação das reações químicas. Contudo, uma pequena, porém expressiva, minoria se opôs à hipótese atômica, com base no argumento de que ela ia além dos fatos.

Em 1826, Dalton recebeu das mãos do famoso químico britânico Humphry Davy a medalha de honra da Real Sociedade de Londres. Enquanto celebrava a importância do trabalho de Dalton, Davy ressaltou que a palavra "áto-

mo" só podia ter, realisticamente, o significado de "equivalente químico", advertindo que o átomo era uma unidade de reação química, e não uma entidade material. Davy homenageou Dalton por sua descoberta da lei que rege as reações químicas, prevendo que sua fama seria baseada nessa descoberta prática, e não em suas especulações sobre entidades invisíveis, ocultas atrás dos fenômenos.

Químicos de diversas nacionalidades uniram-se para combater a hipótese atômica. O notável químico francês Jean Baptiste Dumas, por exemplo, proclamou: "Se fosse dono da situação, eu faria desaparecer da Ciência o termo átomo, persuadido de que ela ultrapassa a experiência, e que, na química, nunca devemos ultrapassar a experiência." O químico alemão Kekulé, famoso por sua descoberta do anel benzênico (que ele supostamente, interpretou de maneira puramente simbólica), encontrou, para dizer sobre o átomo, as seguintes pa-

lavras: "A questão da existência ou inexistência do átomo é pouco significativa sob o ponto de vista químico; sua discussão pertence mais à metafísica. Na química, devemos apenas decidir se o reconhecimento dos átomos constitui uma hipótese condizente com o esclarecimento dos fenômenos químicos."

"E quem já viu uma molécula de gás ou um átomo?" aguilhoava o químico Marcelin Berthelot, expressando o desprezo de muitos dos seus colegas pelas entidades invisíveis, inacessíveis à experiência. Mesmo os seus defensores tinham poucas esperanças de algum dia verificar diretamente a hipótese atômica: o tamanho dessas entidades elementares — caso existissem realmente — era estimado em milhares de vezes menor do que o comprimento de uma onda luminosa, e, por isso, elas seriam, para sempre, tecnicamente invisíveis.

Wilhelm Ostwald, químico alemão que seria, mais tarde, agraciado com o prêmio Nobel,

recorreu à termodinâmica química, como alternativa para a hipótese atômica. As duas leis da termodinâmica — que estabelecem o princípio da conservação da energia, e um limite, baseado na entropia, para o uso dessa energia — tiveram o seu campo ampliado por Maxwell e Gibbs, de modo a descrever com sucesso os detalhes íntimos das reações físicas e químicas, sem necessidade de recurso à hipótese atômica. O êxito da abordagem termodinâmica convenceu Ostwald e seus seguidores de que as moléculas e os átomos não passavam de um produto da imaginação, e que o componente fundamental do universo era, realmente, a energia, sob suas várias formas.

Devido à fé que depositavam na energia, e não em átomos, como fator elucidativo, Ostwald e seus colegas foram apelidados de "energetistas". Acalorados e emocionais debates foram travados nos jornais e conferências científicas entre os energetistas e aqueles que

apoiavam a hipótese atômica. A severa oposição dos anti-atomistas ao trabalho desenvolvido por Ludwig Boltzmann sobre a teoria cinética dos gases, pode ter sido parcialmente responsável pelo suicídio, em 1906, daquele brilhante porém perturbado físico teórico.

Em 1905, mesmo ano em que concebeu a teoria da relatividade, demolindo o éter luminífero, Einstein publicou um trabalho sobre o movimento browniano em que apontava o caminho para a realização de experiências conclusivas, relacionadas è real existência dos átomos.

Sempre que partículas microscópicas se encontram em suspensão num líquido, ocorre, entre elas, uma dança frenética e perpétua, cuja origem permaneceu misteriosa desde a sua descoberta, em 1828, pelo botânico escocês Robert Brown. As primeiras experiências relativas ao movimento browniano foram efetuadas com pólen e, por isso, acreditava-se que a movimen-

tação tinha origem biológica. Ainda me lembro da primeira observação através de um poderoso microscópio, daquilo que me pareceu serem "células", e de como fiquei fascinado por suas incessantes pulsações, semelhantes às de pequeninos corações, até meu professor me dizer que o que eu via era o movimento browniano de partículas de pó. (A propósito, quando finalmente enxerguei as verdadeiras células, elas me pareceram bem menos interessantes do que aquela poeira dançante.) Quando se descobriu que qualquer espécie de material finamente dividido mostrava a mesma agitação (até mesmo pedra retirada da Esfinge foi pulverizada e posta para dançar sob as lentes de um microscópio), a hipótese biológica foi descartada e vários mecanismos físicos foram propostos para substituí-la: gradientes térmicos, tensão superficial, obscuros efeitos eletroquímicos, etc. Nenhum deles funcionou satisfatoriamente: o movimento browniano permaneceu um misté-

rio secundário, escondido em algum recanto escuro da física.

Einstein explicou o movimento browniano como o resultado da ação de numerosos átomos colidindo com a partícula browniana. Essa explicação havia sido anteriormente rejeitada, porque a massa dos átomos era milhões de vezes menor do que a massa da partícula browniana, e sua ação coletiva não poderia resultar em qualquer movimento final, porque a mesma quantidade de átomos estaria pressionando em todas as direções.

Einstein mostrou que, embora o número de átomos que atinge a partícula browniana em cada direção seja, em média, o mesmo, as flutuações desse número em torno da média provocam um desequilíbrio de forças em direções aleatórias. Em qualquer processo aleatório, as flutuações relativas, em torno de um valor médio, são inversamente proporcionais à raiz quadrada do número de amostragens — quanto

menor a amostra, maior a flutuação. Para partículas maiores, a pressão maciça dos átomos circundantes realmente se equilibra, anulandose, mas, para uma partícula pequena, as flutuações do número de átomos colidentes são suficientes para impeli-la numa direção imprevisível com uma força previsível. Caso os átomos existissem, o modelo de Einstein para o movimento browniano permitiria, realmente, a contagem do número de átomos colidentes, mediante a simples medida do deslocamento da partícula browniana sob a ação daquelas forças flutuantes.

Numa sequência de experiências engenhosas, o físico francês Jean Baptiste Perrin verificou o modelo de Einstein e conseguiu, pela primeira vez, contar o número de átomos contidos em uma gota de água. Perrin divulgou a verificação direta da hipótese atômica em 1913, num livro intitulado simplesmente *Les Atomes*.

Ostwald, em 1895, atacara a hipótese atô-

mica num discurso denominado "A derrota do materialismo científico", onde dizia: "Devemos abandonar a esperança de representar o mundo físico mediante o relacionamento dos fenômenos naturais a uma mecânica atômica. 'Mas' — ouço a vossa pergunta — 'o que nos restará para formar uma imagem da realidade, se abandonamos o átomo?' — e a isto respondo: 'Não trareis para vós nenhuma imagem esculpida, ou nenhuma aparência de nada.' Nossa tarefa não consiste em ver o mundo através de um espelho escuro e distorcido, mas o de vê-lo diretamente, até onde a natureza de nossas mentes o permitirem. A função da ciência é discernir as relações entre *realidades*, isto é, entre grandezas que podemos mostrar e medir... Não é sair em busca de forças que não podemos medir, atuando sobre átomos que não podemos ver."

Contudo, em consequência do trabalho de Einstein e Perrin, o líder dos energetistas curvou-se ante a evidência experimental, reco-

nhecendo, finalmente, a existência dos átomos. "Estou agora convencido", disse Ostwald, "de que entramos, recentemente, na posse de evidências experimentais da natureza descontínua ou granulosa da matéria, perseguidas em vão, durante centenas e milhares de anos, pela hipótese atômica. [Experiências como as de Perrin] permitem que os mais cautelosos cientistas possam agora referir- se a uma prova experimental da natureza atômica da matéria. A hipótese atômica foi, assim, elevada à categoria de uma teoria cientificamente fundamentada."

Mais recentemente, em 1957, Hans Reichenbach, o filósofo da ciência, assim resumiu a opinião moderna acerca da hipótese atômica: "A característica atômica da matéria está entre os fatos mais certos do nosso conhecimento atual... podemos falar da existência dos átomos com a mesma certeza com que falamos da existência das estrelas." O átomo, como entidade, é uma realidade que deu certo. Ninguém hoje du-

vida da real existência dessas partículas.

Segundo os pragmatistas, a ciência se assemelha a um livro de cozinha: um simples conjunto de receitas para o preparo dos fenômenos. Quando se possui uma receita que dá certo, o que mais se pode querer? Os realistas querem algo mais. Eles acreditam que uma boa teoria deve funcionar como um folheto de viagem que nos informe sobre o que realmente se pode encontrar no mundo exterior. Nas palavras do notável realista científico Michael Polanyi: "Uma teoria que afirmamos ser racional por si mesma terá poderes proféticos. Aceitamo-la na esperança de estabelecer contato com a realidade; assim, sendo verdadeira, nossa teoria poderá estender a sua verdade através dos séculos vindouros, por caminhos jamais sonhados por seus autores".

A teoria quântica tem sido universalmente bem-sucedida na descrição dos fenômenos, em todos os níveis acessíveis à experimentação. É

um livro de cozinha perfeito para qualquer coisa que se queira cozinhar. Contudo, esse amplo sucesso prático tem sido acompanhado de um desacordo sem precedentes acerca do significado real da teoria quântica, e de uma consequente confusão sobre qual o tipo de realidade em que se apoia o mundo dos fenômenos.

No capítulo seguinte examinaremos algumas das contraditórias realidades quânticas, que os diferentes físicos afirmam ser a "realidade real", oculta sob a aparência externa deste mundo em que vivemos.

2. Os Físicos Perdem o Controle da Situação

> Nenhum desenvolvimento da ciência moderna provocou no pensamento humano um impacto mais profundo do que o advento da teoria quântica. Os cientistas da geração anterior à nossa, arrancados de seus antiquíssimos padrões de pensamento, se viram compelidos a adotar uma nova metafísica. O revés causado por essa reorientação continua presente em nossos dias. Os físicos, basicamente, sofreram uma severa perda: o domínio da realidade.
> Bryce DeWitt - Neill Graham

Um dos mais bem guardados segredos da ciência é o fato de que os físicos perderam o seu

pulso sobre a realidade.

As notícias sobre a crise de realidade raramente extravasam a comunidade dos físicos. O que fecha a porta ao público é, em parte, a barreira da linguagem — o formalismo matemático que facilita a comunicação entre os cientistas é incompreensível para os estranhos à comunidade científica — e, em parte, a tendência natural dos físicos para divulgarem os seus êxitos e manterem em surdina as suas confusões e incertezas. Até mesmo entre eles, os físicos preferem evitar o incômodo assunto da realidade, em favor de questões “mais concretas". Divulgações populares recentes, como a de Heinz Pagei em seu *Cosmic code,* começam a informar o público sobre a crise de realidade que grassa na física. Em *A realidade quântica* pretendo estudar, com detalhes claros e inéditos, como os físicos lidam — ou não conseguem lidar — com a realidade.

Nada mostra tão completamente a perple-

xidade que invade a alma dos físicos do que certas afirmações aparentemente absurdas, expressas por uns poucos físicos mais desinibidos, sobre a maneira pela qual o mundo realmente funciona. Se considerarmos tais afirmações com base no seu significado aparente, o que os físicos estão dizendo nos fará lembrar as histórias contadas pelos místicos e loucos. Os físicos estão sempre prontos a rejeitar tais desagradáveis associações e insistem em dizer que suas afirmações estão baseadas em simples fatos. "Não fazemos essas afirmações por ignorância", dizem eles, "como os antigos atribuíam às terras desconhecidas uma geografia plausível. Não é a ignorância, mas o surgimento de conhecimentos inesperados, o que nos impõe uma nova visão de como as coisas realmente são."

A nova visão dos físicos ainda não está clara, como mostra a multiplicidade de suas afirmações, mas seja qual for o resultado final, es-

te certa mente estará perto de ser classificado como extraordinário. Para dar ao leitor uma amostra da realidade quântica, farei um resumo dos pontos de vista de seus mais proeminentes criadores, sob a forma de oito realidades que representam as oito principais suposições a respeito do que realmente está acontecendo nos bastidores. Em seguida, examinaremos cada uma dessas realidades mais detalhadamente e veremos como os diversos físicos utilizam os mesmos dados para justificar imagens do mundo .tão diferentes entre si.

Realidade Quântica # 1: A interpretação de Copenhague, Parte I (Não existe nenhuma realidade profunda.) Ninguém exerceu maior influência sobre as nossas noções daquilo que seria o mundo quântico do que o físico holandês Niels Bohr, e foi ele quem expressou uma das mais chocantes afirmações da física quântica: não existe nenhuma realidade profunda.

Bohr não nega a evidência de seus sentidos. O mundo que vemos em torno de nós é suficientemente real, afirma ele, mas flutua num mundo que não é real. Os fenômenos comuns não são oriundos de outros fenômenos, mas de outro tipo de entidade inteiramente diversa.

Longe de ser uma esquisitice ou postura minoritária, a afirmação de que "não existe nenhuma realidade profunda" representa a doutrina predominante na física estabelecida. Por ter sido desenvolvida no instituto de Copenhague, de Niels Bohr, essa realidade quântica foi denominada "interpretação de Copenhague". Sem temerem as eventuais contestações de dissidentes de tendência realista, os físicos, em sua maioria, juraram fidelidade, pelo menos nominal, ao credo antirrealista de Bohr. Que indício da profundidade atingida pela crise de realidade poderia ser mais fulgurante do que a rejeição oficial da própria realidade por grande parte da comunidade dos físicos?

Einstein e outros físicos proeminentes acharam que Bohr tinha ido longe demais em sua conclamação em favor de uma crua renúncia da realidade profunda. Certamente, Bohr quis apenas dizer que devíamos todos ser bons pragmatistas e não estender nossas especulações além do alcance de nossas experiências. Com base nos resultados das experiências efetuadas na década de 20, como poderia Bohr concluir que nenhuma tecnologia futura jamais revelaria uma verdade mais profundaΔ Com certeza, Bohr nunca pretendeu realmente *negar* a realidade profunda, mas, meramente, pregar um ceticismo cauteloso com relação a especulativas realidades ocultas.

Bohr rejeitou essa versão esmaecida da doutrina de Copenhague. Em termos que devem ter enregelado o coração dos realistas. Bohr reafirmou: *"Não existe nenhum mundo quântico.* Existe apenas uma descrição quântica abstrata."

Werner Heisenberg, o Cristóvão Colombo da teoria quântica, primeiro a pôr os pés no novo mundo matemático, assumiu uma posição igualmente dura contra os físicos saudosos da realidade, entre eles Einstein, quando escreveu: "A esperança de que novas experiências nos conduzirão de volta a acontecimentos objetivos no espaço e no tempo é, aproximadamente, tão bem fundamentada quanto a expectativa de que descobriremos o fim do mundo nas regiões inexploradas da Antártica."

Os escritos de Bohr e Heisenberg têm sido criticados e considerados pouco claros e abertos a muitas interpretações. Recentemente, N. David Mermin, físico da Universidade Cornell, resumiu claramente a posição antirrealista de Bohr, em palavras que deixam pouco lugar para equívocos: "Agora sabemos, e podemos demonstrar, que a lua não está lá quando ninguém olha para ela." (Daremos uma olhada na "demonstração" de Mermin no Capítulo 13.)

Realidade Quântica # 2: A interpretação de Copenhague, Parte II (A realidade é criada pela observação.) Embora não acreditem na realidade profunda, os numerosos físicos da escola de Copenhague afirmam a existência da *realidade fenomenal.* O que observamos é indubitavelmente real, dizem eles, mas esses fenômenos não estão realmente ali, quando não há observação. A interpretação de Copenhague consiste, propriamente, de duas partes distintas: 1. Na ausência de observação, não existe qualquer realidade; 2. A observação cria a realidade. “Você cria a sua própria realidade", é o tema de *Taking the Quantum Leap,* de Fred Wolf.

Dentre os inumeráveis processos do mundo, quais os que podem ser qualificados como observaçõesΔ Dentre as características de uma observação, qual é a particularidade que lhe confere o poder de criar a realidadeΔ Questões

como essas dividem em vários campos a escola dos que creem na realidade criada pela observação, porém todos, de um modo geral, adotam o memorável aforismo de John Wheeler para distinguir, no mundo, o que é e o que não é real: "Nenhum fenômeno elementar é real, a menos que seja um fenômeno observado. "Sem dúvida, a descrição da lua inconstante, de Mermin, qualifica-o como membro dessa escola.

A crença de que a realidade é criada pelo observador é um dos lugares-comuns da filosofia, onde serve de tema para várias formas de idealismo. Bertrand Russell refere-se à sua fascinação pelo idealismo, nos seus tempos de estudante no Trinity College: "Essa filosofia me trouxe conforto durante algum tempo... Havia um curioso prazer na autopersuasão de que o tempo e o espaço são irreais, que a matéria é uma ilusão e que o mundo consiste de nada mais que a mente."

Considerando que a matéria dotada de mas-

sa é o feijão-com- arroz dos físicos, poucos dentre estes partilhariam o gosto de Russell pela matéria como simples miragem. Contudo, gostem ou não, muitos físicos, devido à prática escrupulosa da teoria quântica, seguem uma trilha não muito afastada do mundo onírico dos idealistas.

Realidade Quântica # 3: (A realidade é um todo indiviso.) O ponto de vista de Walter Heitler, autor de um livro didático adotado no estudo da interação luz/matéria, exemplifica uma inusitada terceira afirmação dos físicos quânticos: a despeito de suas evidentes partições e fronteiras, o mundo é, na verdade, um todo contínuo e indivisível. Essa conclusão foi desenvolvida em *Tao of Physics,* de Fritjof Capra, que a relacionou aos ensinamentos de certos místicos orientais. Heitler aceita uma realidade criada pelo observador, mas acrescenta que o ato de observar dissolve os limites entre o

observador e aquilo que é observado. "O observador surge como parte necessária da estrutura total e em sua plena capacidade como ser consciente. A partição do mundo entre 'uma realidade objetiva externa' e 'nós', os espectadores autoconscientes, já não pode ser mantida. Objeto e sujeito tornaram-se inseparáveis."

O físico David Bohm, do Birkbeck College de Londres, ressaltou particularmente a necessária inteireza do mundo quântico: "Somos conduzidos a uma nova noção de inteireza contínua que nega a possibilidade de uma análise clássica do mundo, através de sua divisão em partes isoladas e independentes... A indivisível interconectibilidade quântica de todo o universo constitui a realidade fundamental".

A inteireza quântica não é uma simples repetição do velho ditado que afirma que tudo está ligado a tudo, nem é, também, um eco atual, por exemplo, da concepção newtoniana de que a gravidade liga cada partícula a todas as ou-

tras. Todas as conexões comuns — como a gravidade — inevitavelmente enfraquecem com a distância, o que confere uma esmagadora importância às conexões próximas, enquanto as conexões distantes se tornam desprezíveis. Estamos todos, sem dúvida, interligados de alguma forma, mas as ligações próximas têm um peso maior. Contudo, a inteireza quântica é, fundamentalmente, uma nova forma de relacionamento íntimo, que não enfraquece com a distância no espaço ou no tempo. Essa nova noção quântica não se refere a associações estabelecidas ao acaso, mas a uma verdadeira combinação de entidades distantes, que se estende através da galáxia com a mesma intensidade com que se estende através do jardim.

Realidade Quântica # 4: Interpretação dos mundos múltiplos (A realidade consiste de um número sempre crescente de universos paralelos). De todas as afirmações da Nova Física,

nenhuma é mais chocante do que a alegação de que miríades de universos são criados no momento em que uma mensuração é efetuada. Para qualquer situação em que se possa chegar a resultados diferentes (uma decisão por cara-ou-coroa, por exemplo), alguns físicos creem que todos *os resultados realmente ocorrem.* A fim de acomodar os diferentes resultados, sem contradições, dá-se o nascimento de novos universos completos, idênticos em todos os detalhes, com exceção do resultado isolado que lhes deu origem. No caso da moeda, um dos universos contém uma moeda que deu cara e outro contém uma moeda que deu coroa. Paul Davies defende essa afirmação, conhecida como interpretação dos mundos múltiplos, em seu livro *Other Worlds.* Os autores de ficção científica geralmente inventam universos paralelos para melhorarem o enredo da estória. Agora, a teoria quântica nos dá uma boa razão para tomarmos a sério essas estórias.

Num artigo para a *Physics Today,* importante revista da comunidade de físicos americanos, Bryce DeWitt descreve o seu contato inicial com a interpretação dos mundos múltiplos da teoria quântica:

> "Ainda trago vivo na memória o choque do meu primeiro encontro com esse conceito dos mundos múltiplos. A ideia de 10^{100+} cópias ligeiramente imperfeitas de nós mesmos, todas permanentemente se dividindo em mais cópias que, finalmente, se tornam irreconhecíveis, não é facilmente aceita pelo bom senso..."

Criada em 1957 por Hugh Everett, um aluno de pós-graduação de Princeton, a interpretação dos mundos múltiplos foi das últimas a chegar ao cenário da Nova Física. Não obstante a estranha conclusão de que inumeráveis universos paralelos, cada um deles tão real quanto

o nosso, de fato existem, a imagem dos mundos múltiplos de Everett obteve considerável apoio entre os teóricos quânticos. A sugestão de Everett é especialmente atraente para os teóricos porque resolve, conforme veremos, o principal enigma da teoria quântica — o famoso problema da mensuração do quantum.

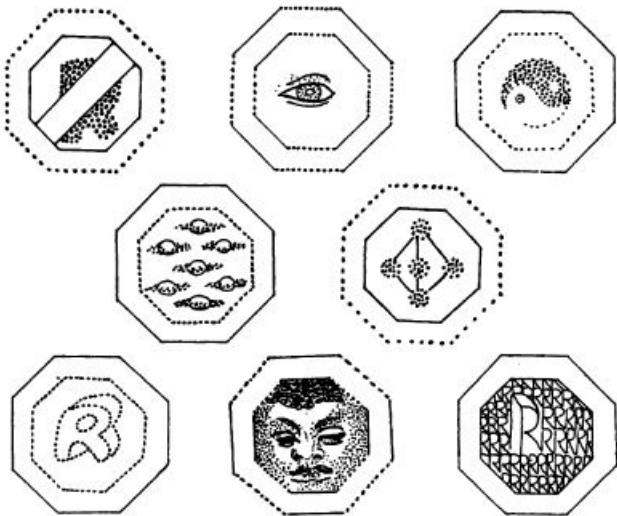



Fig. 2.1. Oito emblemas para a realidade quântica: qual desses mundos (caso exista algum) se oculta sob os fatos quânticos?

As quatro realidades quânticas apresentadas deveriam dar ao leitor uma ideia da diversidade das afirmações relativas à natureza definitiva do mundo. Enquanto os seguidores de Everett endossam um número incontável e sem-

pre crescente de mundos quânticos, os discípulos de Bohr e Heisenberg insistem em que não existe *nem mesmo um único* mundo quântico. Em sua luta para encontrar terreno firme no piso escorregadio do fato quântico, os físicos criaram outras realidades além dessas quatro. Conservemo-nos alertas enquanto prosseguimos.

Realidade Quântica # 5: A lógica quântica (O mundo obedece a um tipo de raciocínio não humano). Os estudiosos da lógica quântica afirmam que a revolução quântica é tão profunda que a simples substituição dos conceitos antigos por conceitos novos não será o bastante. No confronto com fatos quânticos, precisamos atirar ao lixo o nosso modo próprio de raciocinar, adotando uma nova lógica quântica.

A *lógica* constitui o arcabouço do nosso corpo de conhecimentos. É ela que nos diz como devemos usar alguns dos menores termos

da linguagem, palavras *e, ou* e *não*. O comportamento desses pequenos conectores linguísticos rege o modo como falamos das coisas e, consequentemente, estrutura o nosso modo de pensar a respeito delas. Durante dois mil anos, a maneira de falar sobre lógica (no mundo ocidental) seguiu os moldes criados por Aristóteles. Em meados do século XIX, George Boole, um mestre-escola irlandês, reduziu as declarações lógicas a simples expressões aritméticas, mediante a criação de uma linguagem artificial simbólica que desnudou o esqueleto da linguagem comum.

A codificação clara das regras que governam a razão, criada por Boole, sacudiu a lógica, arrancando-a da Idade Média, e lançou a florescente ciência da lógica matemática. À margem da corrente matemática, alguns criativos estudiosos da lógica divertiam-se construindo "lógicas loucas", mediante a utilização de outras regras que não as de Boole. Esses modelos dis-

torcidos para o emprego de *e/ou/não,* embora matematicamente consistentes, foram considerados como meras curiosidades, pois não pareciam se enquadrar em nenhum padrão de discurso humano.

Contudo, de acordo com alguns dos Novos Físicos, uma dessas lógicas malucas poderia ser justamente o que se precisava para dar algum sentido aos eventos quânticos. Ouçamos o teórico quântico David Finkelstein. conclamando a revolta contra as regras de Boole:

"Einstein jogou fora o conceito clássico de *tempo;* Bohr joga fora o conceito clássico de *verdade*... Nossas noções clássicas de lógica estão simplesmente erradas, num sentido basicamente prático. O próximo passo será aprender a pensar de maneira correta, aprender a pensar segundo a lógica quântica."

Como exemplo da utilidade de uma mudança da mente, ao invés de uma mudança da física, os seguidores da lógica quântica apontam

a teoria geral da relatividade, de Einstein, que conseguiu, no domínio da geometria, o que eles pretendem fazer com a lógica.

A geometria é a ciência dos pontos e das linhas. Durante dois mil anos, existiu uma só geometria, com regras compiladas pelo matemático grego Euclides em seu livro *Os elementos*, um *best-seller* que chegou a rivalizar com a Bíblia em popularidade. A última reapresentação de *Os elementos* de Euclides é o livro escolar de geometria do leitor.

Concomitantemente com o trabalho pioneiro de Boole na lógica, uns poucos matemáticos aventurosos imaginaram "geometrias loucas", jogos que pontos e linhas podiam praticar, à margem das regras euclidianas. O principal arquiteto da Nova Geometria foi o russo Nikolai Lobachevski, acompanhado dos matemáticos alemães Karl Gauss e Georg Riemann. Suas geometrias tortas, bem como as lógicas não-boolianas, eram vistas como jogos de alta matemá-

tica, coisas inteligentes, mas sem qualquer contato com a realidade. A geometria euclidiana, como todos sabem, era *a* geometria, constituída, de nada mais que bom senso aplicado a triângulos e outras figuras geométricas.

Contudo, em 1916, Einstein apresentou uma nova e radical teoria da gravidade que demoliu o monopólio euclidiano. Opondo- se a Newton, e a todos mais, Einstein declarou que *a gravidade não é uma força, mas uma curvatura do espaço-tempo.* Os corpos em queda livre estão realmente livres e se movem segundo linhas tão retas quanto possível — isto é: linhas retas segundo os padrões de uma geometria deformada pela gravidade. A teoria de Einstein tem efeitos verificáveis, como por exemplo o desvio de um raio de luz estelar que roça o sol (confirmado por Eddington em 1919) e a existência dos buracos negros (de acordo com os astrofísicos, existe um deles na constelação do Cisne, denominado Cisne X-1). Em nosso pla-

neta, onde se formou o nosso bom senso, a gravidade é fraca e o espaço é quase euclidiano; nas proximidades de X-1, a geometria escolar seria reprovada.

Os estudiosos da lógica quântica dizem que a lição de Einstein é de fácil entendimento. A questão da verdadeira geometria do mundo não é resolvida pelo bom senso, mas pela experimentação. O mesmo acontece com a lógica: não procureis em vossa cabeça as regras do raciocínio correto; ide a um laboratório de pesquisas.

Realidade Quântica # 6: Neorrealismo (O mundo é constituído de objetos comuns). Um objeto comum é uma entidade que possui qualidades próprias, quer esteja ou não sendo observado. Com determinadas exceções (miragens, ilusões, alucinações), o mundo exterior parece ocupado por entidades semelhantes a objetos. A clareza e ubiquidade da realidade comum

têm levado alguns físicos — que eu chamo de neorrealistas — a imaginarem que esse tipo de realidade que nos é familiar pode ser estendido aos domínios dos átomos e mais além. Contudo, a opinião ordinária e sensata de que esses objetos comuns são, por sua vez, constituídos de objetos, é, na verdade, a mais negra heresia da física atual.

"Átomos não são coisas", diz Heisenberg, um dos sumos-sacerdotes da crença quântica ortodoxa, que compara os neorrealistas aos que acreditam numa Terra plana. "Não existe nenhum mundo quântico", alertou Bohr, o papa de Copenhague, "o que existe é apenas uma descrição quântica abstrata".

Os neorrealistas, por outro lado, acusam a maioria ortodoxa de estar chafurdando num formalismo vazio, e de estar obscurecendo a simplicidade do mundo com um mistério desnecessário. Ao invés disso, eles pregam o retorno a uma crença pura e mais primitiva. No co-

mando dos rebeldes neorrealistas estava Einstein, cuja paixão pelo realismo levava-o a opor-se frontalmente à ortodoxia quântica: "A tranquilizante filosofia — ou religião? — de Heisenberg-Bohr é tão delicadamente tramada que, temporariamente, fornece ao verdadeiro crente um suave travesseiro, do qual ele não poderá facilmente ser erguido. Deixemo-lo, então, repousar."

A despeito das noções pré-históricas que os neorrealistas possuem, ninguém pode acusá-los de ignorarem a teoria quântica. Muitos, dentre eles, foram os progenitores dessa teoria. Ao lado de Einstein, os proeminentes neorrealistas incluem Max Planck, cuja descoberta da constante de ação fez deflagrar a revolução quântica; Erwin Schrödinger, que arquitetou a equação ondulatória que todos os sistemas quânticos devem obedecer; o príncipe Louis de Broglie, que tomou em tal consideração a teoria quântica, a ponto de prever a natureza ondula-

tória da matéria.

De Broglie, aristocrata francês cujo envolvimento com o rádio, ao tempo da guerra, desviou para a física as suas pesquisas sobre a história eclesiástica, defendeu o realismo comum até 1928, quando se converteu à *interpretação estatística* (outra denominação para a escola de Copenhague). Vinte anos mais tarde, contudo, influenciado pela revivificação neorrealista de David Bohm, de Broglie retratou-se e retornou à fé de sua juventude:

"Aqueles que se interessam pela psicologia dos cientistas podem estar curiosos a respeito das razões de minha inesperada volta a ideias já descartadas... Penso não tanto nas constantes dificuldades que encontrei no desenvolvimento de uma interpretação estatística da mecânica ondulatória, ou mesmo no meu secreto anseio por uma clareza cartesiana em meio à névoa que parecia envolver a física quântica [mas no fato de que, enquanto examinava a figuração

estatística], não podia deixar de sentir-me impressionado com a força das objeções contra aquela física e com uma certa obscuridade dos argumentos em seu favor... demasiadamente abstrata... demasiadamente esquemática... Descobri que tinha sido seduzido pelo modismo da época, e comecei a entender por que me sentia constrangido sempre que tentava fazer uma avaliação lúcida da interpretação probabilística."

Uma das poucas tradições da comunidade dos físicos é o costume de celebrar o aniversário de seus membros importantes com uma *Festschrift* — um festival de documentos. Em 1928, Louis de Broglie, com noventa anos de idade e gloriosamente não arrependido, foi homenageado dessa forma erudita por seus colegas cientistas. Virtualmente, todos os neo-realistas do mundo compareceram à festa do aniversário de Broglie: não foi necessário requisitar cadeiras extras.

Einstein, a despeito de suas numerosas contribuições para o sucesso da teoria quântica, nunca aceitou-a em seu coração e conservou, obstinadamente, a antiquada crença de que a visão realística do mundo era compatível com os fatos quânticos. Na década de 30, Einstein e Bohr mantiveram um longo debate sobre a questão da realidade quântica. Bohr sustentava que, no que concernia à realidade, a teoria quântica era assunto encerrado. Por volta de 1928, os físicos de percepção mais penetrante já haviam entendido a essência da teoria. Esta ainda seria desenvolvida em seus detalhes, mas seus princípios não seriam alterados. A confiança de Bohr continuava recebendo apoio; cinquenta anos depois, os físicos ainda seguem as antigas regras.

A teoria quântica é completa como está, disse Bohr. Não há necessidade de objetos comuns. Além disso, tais objetos não podem ser adicionados á teoria sem danos para o êxito de

sua capacidade previsora. Os objetos comuns não são simplesmente adornos desnecessários á teoria quântica; a sua adição é totalmente impossível.

A estratégia de Einstein consistia em confrontar Bohr com uma série de experiências intelectuais visando a mostrar que a teoria quântica deixara de tomar em consideração alguma coisa. Ele não pretendia mostrar que a teoria estivesse *errada,* mas que estava *incompleta* e, com isso, esperava abrir as portas para o que chamava "elementos de realidade".

Segundo os vencedores, Bohr fechou todas as brechas abertas por Einstein, mas nas mentes de cada um dos contendores o debate jamais foi concluído. Muito tempo depois de terminada a discussão, no dia da morte de Bohr, o seu quadro-negro continha o desenho de uma das experiências intelectuais de Einstein. Bohr lutara com Einstein até o fim.

Einstein, também, nunca desistiu. Em sua

autobiografia, deixou expressos os seus pensamentos finais sobre a questão da realidade quântica: "Ainda creio na possibilidade de um modelo de realidade — isto é, uma teoria que represente as coisas em si, e não apenas a probabilidade de sua ocorrência."

Realidade Quântica # 7: (A consciência cria a realidade.) Dentre os realistas que aceitam a criação da realidade pelo observador, uma pequena facção afirma que somente os instrumentos dotados de consciência (como eu ou o leitor) teriam o privilégio de criar a realidade. Os observadores conscientes são os únicos que contam. A consciência criadora da realidade foi estudada por Denis Postle em *Fabric of the Universe.* Incluo aqui essa realidade quântica não apenas por ela ser tão estranha, mas, também, porque ela conta com partidários tão ilustres. Entre os adeptos da realidade criada pela consciência podemos citar o físico teó-

rico da luz/matéria Walter Heitler, já citado quando nos referimos à inteireza indivisa; Fritz London, famoso por seu trabalho sobre os líquidos quânticos; Henry Pierce Stapp, de Berkeley, teórico da matriz-S; Eugene Wigner, agraciado com o prêmio Nobel; e o mundialmente conhecido matemático John von Neumann.

O húngaro von Neumann serviu de parteiro para os mais impressionantes progressos do século XX. Onde quer que a situação estivesse difícil, o brilhante von Neumann parecia estar lá, dando uma mão. No final da década de 40, ele concebeu o computador programável; atualmente, os cientistas da computação se referem a todos os computadores, desde as calculadoras de bolso até os gigantes da IBM, como "máquinas de von Neumann". Colaborando com Oskar Morgenstern, von Neumann lançou os fundamentos matemáticos da teoria dos jogos estratégicos, na qual está baseada a po-

lítica de muitos governos e corporações, tanto no Oriente como no Ocidente. Trabalhou, também, nos primeiros robôs e ajudou no desenvolvimento da bomba atômica. Em 1936, juntamente com Garrett Birkhoff, matemático de Harvard, von Neumann sugeriu a ideia da lógica quântica, porém sua maior contribuição para a pesquisa da realidade quântica foi o seu livro sobre a teoria do quantum.

Ao terminar a década de 20, os físicos haviam construído uma teoria quântica, que satisfazia as suas necessidades do dia-a-dia, utilizando uma grosseira estrutura matemática que organizava os fatos quânticos. Nesse ponto, von Neumann entrou em cena, dando uma forma rigorosa à crua teoria dos físicos, colocando a teoria quântica num elegante edifício matemático denominado "espaço de Hilbert", onde ela reside até hoje, e conferindo à recém-nascida teoria física o selo de aprovação dos matemáticos.

Em 1932, von Neumann pôs no papel a

sua visão definitiva da teoria quântica, em um formidável tomo intitulado *Die mathematische Grundlagen der Quantenmechanik.* Nossa imagem mais geral da teoria quântica permanece essencialmente igual à delineada por von Neumann em *Die Grundlagen* (Os fundamentos).

O livro de von Neumann é a nossa bíblia quântica. Como muitos outros textos sagrados, ele é lido por poucos, venerado por muitos. A despeito de sua importância, essa obra só foi traduzida para o inglês em 1955.

Muitos dos assuntos discutidos em *A realidade quântica* foram dados ao público, pela primeira vez, no livro de von Neumann. Lá está, por exemplo, a *prova de von Neumann* de que, sendo correta a teoria quântica, o mundo não poderá ser constituído de objetos comuns — i.e., a interpretação neorrealista é logicamente impossível. Von Neumann colocou, mas não resolveu, de modo a satisfazer a todos, o famoso problema da medição quântica, tema

central da questão da realidade quântica. Em compensação, von Neumann foi o primeiro a mostrar o modo pelo qual a teoria quântica sugere um papel ativo para a consciência do observador. "Os objetos físicos não possuirão quaisquer atributos", disse von Neumann, "enquanto não estiverem sob a observação de uma entidade consciente."

Propriamente, von Neumann apenas insinua, em parábolas obscuras, a criação da realidade pela consciência. Seus seguidores, corajosamente, levaram os argumentos do mestre á conclusão lógica: "Se aceitarmos a versão de von Neumann da teoria quântica", dizem eles, "uma realidade criada pela consciência será o resultado inevitável."

No âmago lógico de nossa ciência mais materialista, não encontramos matéria morta, mas nossos próprios "eus" vivos. Eugene Wigner, colega de von Neumann em Princeton e, também, húngaro (frequentaram o mesmo colégio

em Budapest), critica esse irônico desvio dos eventos: "Não é possível formular as leis da mecânica quântica, de maneira inteiramente consistente, sem que se faça referência à consciência... Qualquer que seja o rumo futuro do desenvolvimento de nossos conceitos, sempre nos parecerá extraordinário o fato de que o próprio estudo do mundo exterior nos conduza à conclusão de que o conteúdo da consciência é uma realidade final."

Realidade Quântica # 8: O mundo duplo de Werner Heisenberg (O mundo é duplo, consistindo de potencialidades e realidades.) A maioria dos físicos crê na interpretação de Copenhague, que afirma não existir qualquer realidade profunda (RQ # 1) e que a observação cria a realidade (RQ # 2). O que essas duas realidades quânticas têm em comum é a afirmação de que *somente os fenômenos são reais*; o mundo sob os fenômenos não é real.

Essa posição provoca, imediatamente, a seguinte pergunta: "Se a observação cria. a realidade, esta é criada a partir de quê? Os fenômenos são criados a partir do nada, ou a partir de algo mais substancial?" Como a natureza da realidade não medida é, por definição, inobservável, muitos físicos descartam tais questões por considerá-las sem sentido no terreno pragmático.

Contudo, considerando que a teoria quântica descreve, com exatidão, a realidade medida, ela deve conter algumas pistas relativas à matéria-prima de que são formados os fenômenos. Usando a força da imaginação, talvez possamos dar uma olhada sob a teoria e fazer alguma conjectura inteligente a respeito do mundo sobre o qual se ergue o nosso mundo familiar das observações consistentes.

Werner Heisenberg estava inteiramente a par das dificuldades que encontraria para descrever o mundo subfenomenal: "Aqui, os pro-

blemas de linguagem são extremamente difíceis", disse ele. "Queremos falar, de algum modo, sobre a estrutura dos átomos e não apenas sobre 'fatos' como, por exemplo, das gotículas de água numa câmara de neblina. Mas não podemos falar sobre átomos em linguagem comum." Embora percebesse a dificuldade de fazê-lo, Heisenberg foi um dos poucos físicos que tentaram externar o que viam quando olhavam dentro da realidade quântica.

De acordo com Heisenberg, não há nenhuma realidade profunda — nada lá embaixo que seja real, no mesmo sentido em que os fatos fenomenais são reais. O mundo não medido é apenas semirreal, e atinge o pleno *status* de realidade durante o ato da observação: "Nas experiências relativas aos eventos atômicos devemos lidar com coisas e fatos, com fenômenos que são tão reais quanto os fenômenos da vida diária. Porém, os átomos e as partículas elementares não são assim tão reais; eles formam

um mundo de potencialidades ou possibilidades, e não de coisas ou fatos... A onda probabilística... significa uma tendência para alguma coisa. Ela é uma versão quantitativa do velho conceito d*e potentia,* da filosofia de Aristóteles. Ela introduz algo que está entre a ideia de um evento e o evento propriamente dito, um estranho tipo de realidade física, entre possibilidade e realidade."

O mundo heisenberguiano de *potentia é ao* mesmo tempo mais real e menos real do que o nosso mundo. É menos real porque seus habitantes gozam de um fantasmagórico estilo de vida quântico, constituído de meras tendências, não de realidades. Por outro lado, o mundo não medido é mais real porque contém uma abundância de possibilidades coexistentes, em grande parte contraditórias. No mundo de Heisenberg, uma moeda pode dar simultaneamente cara e coroa, uma eventualidade inexistente em nosso mundo.

Um dos fatos inevitáveis da vida é que todas as nossas escolhas são realmente escolhas. Tomar um caminho significa desistir dos outros. A experiência humana comum não engloba eventos contraditórios simultâneos, ou histórias múltiplas. Para nós, o mundo possui uma singularidade e uma materialidade inexistentes nos domínios do átomo. Aqui ocorre somente um evento por vez; mas esse evento realmente ocorre.

Por outro lado, o mundo quântico não é, como o nosso, um mundo de eventos reais, e sim um mundo cheio de numerosas e irrealizadas tendências para a ação. Essas tendências estão permanentemente em movimento — crescem, juntam-se, morrem — segundo leis precisas de movimento, descobertas por Schrödinger e seus colegas. Porém, não obstante toda essa atividade, *nada jamais realmente acontece lá.* Tudo permanece estritamente nos domínios da possibilidade.

Os dois mundos de Heisenberg estão ligados por uma interação particular que os físicos denominam "medição". No decorrer do ato mágico da medição, uma possibilidade quântica é singularizada, abandona suas indistintas irmãs, e surge na superfície do nosso mundo como um evento real. Tudo o que acontece em nosso mundo provém de possibilidades adrede preparadas naquele outro mundo — o mundo de potencialidades quânticas. Por outro lado, o nosso mundo estabelece limites para a movimentação dessa multidão de potencialidades. Devido a que certos fatos são reais, nem tudo é possível no mundo quântico. Não existe nenhuma realidade profunda, considerada a nossa noção de realidade; pelo contrário, o universo não observado é constituído de possibilidades, tendências, impulsos. A base do nosso mundo cotidiano, segundo Heisenberg, não é mais sólida do que uma promessa.

Os físicos não propõem essas realidades

quânticas como especulação de ficção científica sobre mundos que poderiam existir, e sim como figurações sérias de um mundo onde realmente vivemos: o universo lá fora. Sendo essas realidades quânticas radicalmente diferentes entre si, poder-se-ia esperar que tivessem consequências experimentais também diversas. Contudo, a característica surpreendente dessas oito realidades quânticas é serem elas experimentalmente indistinguíveis. Para todas as experimentações concebíveis no presente, *cada uma dessas realidades prevê exatamente o mesmo fenômeno observável.*

Os filósofos da antiguidade enfrentaram uma semelhante crise de realidade. Por exemplo, três realidades antigas - 1 . O mundo repousa sobre uma tartaruga; 2. O mundo é um sólido infinitamente profundo; 3. O mundo flutua num oceano infinito - conduziam a consequências idênticas, consoante o que se podia afirmar na época.

Do mesmo modo, os físicos modernos não sabem como determinar experimentalmente o tipo de mundo em que vivem. Contudo, considerando que "a realidade tem consequências", podemos esperar que experiências futuras, não limitadas pelos nossos conceitos usuais de mensurabilidade, possam confirmar uma ou mais dessas bizarras figurações como a campeã. No entanto, presentemente, cada uma dessas realidades quânticas pode ser vista como uma alternativa viável para "a real maneira de ser do universo". Todas elas podem, no entanto, estar erradas.

A crise de realidade dos físicos tem duas faces: 1. Há realidades quânticas demais; 2. Todas, sem exceção, são absurdas. Algumas dessas realidades quânticas são compatíveis entre si. Por exemplo, RQ # 1 (Não existe nenhuma realidade profunda) e RQ # 2 (A realidade é criada pelo observador) são, de fato, duas metades de uma única imagem consistente do

mundo, denominada interpretação de Copenhague. Outras, porém, são contraditórias. Por exemplo, na interpretação dos mundos múltiplos, a realidade profunda do mundo é constituída por quatrilhões de universos simultâneos, cada um deles tão real quanto o nosso, o que ridiculariza, ao máximo, a afirmação feita por Bohr, de que não existe nenhuma realidade profunda. Além de não conseguirem chegar a um acordo para eleger, dentre as diversas imagens, aquela que retrata o que realmente está acontecendo no mundo quântico, os físicos nem mesmo têm certeza de que a imagem correta faz parte da lista.

Nenhuma das opções conflitantes, propostas pelos físicos como imagens viáveis do universo que habitamos, pode ser considerada comum. Até mesmo a realidade quântica mais próxima da antiga noção de como um mundo deve se comportar — a alegação neorrealista (RQ # 6) de que o mundo é constituído de ob-

jetos comuns — contém, conforme veremos, o requisito de que alguns desses objetos se movem mais rapidamente do que a luz, o que acarretaria consequências inusitadas, tais como, por exemplo, viagens no tempo e reversão da causalidade.

O presente livro é uma fotografia da crise de realidade na física, tirada num momento em que essa crise não foi, ainda, resolvida. Ninguém sabe como o mundo será daqui a cem anos. Provavelmente, ele parecerá muito diferente do que imaginamos hoje. Aqui está o que John Wheeler, um físico ativamente preocupado com a natureza da realidade quântica, imagina quando olha para o futuro:

> "Pode não haver nada semelhante ao 'cintilante mecanismo central do universo' a ser contemplado através de uma parede de vidro no fim do caminho. Talvez não maquinaria, mas mágica, seja a melhor descri-

ção do tesouro que nos espera."

3. A Teoria Quântica Assume o Posto

> Alguns físicos prefeririam voltar à ideia de um mundo real objetivo cujas menores partes existissem objetivamente, assim como as pedras ou as árvores existem, independentemente de as estarmos observando. Isso, contudo, é impossível.
> Werner Heisenberg

No final do século XIX, os físicos possuíam uma imagem abrangente do modo pelo qual o mundo funcionava. Uns poucos grandes homens haviam solucionado os grandes problemas. A tarefa de seus sucessores seria preencher os detalhes, estender as medições até à casa decimal seguinte. Nada de glorioso. Tendo explicado tudo, a física clássica parecia ter encerrado as suas ati-

vidades. "A física acabou, meu jovem. É uma rua sem saída", disse o professor de Max Planck, e aconselhou-o a optar pela carreira de pianista.

O triunfo da física clássica durou pouco. Os paradoxos da teoria quântica logo levaram de roldão as certezas vitorianas. Mas enquanto durou, a física do século XIX representou o ponto alto da aplicação do bom senso. Ela não só parecia explicar todos os fatos, como o fazia de modo claro e pictoricamente representável.

MATÉRIA E CAMPO - AS ENTIDADES BÁSICAS DA FÍSICA CLÁSSICA

Os físicos clássicos conseguiram dar conta de toda a variedade do mundo através de apenas duas entidades físicas: a matéria e os campos. Naqueles tempos de inocência não era preciso dizer que aquelas entidades estavam *realmente lá.* A crise de realidade dos físicos ainda não

chegara.

Matéria real. Campos reais. Deixe cair uma maçã do alto da ponte. A maçã é constituída de matéria. Ela se move porque o campo gravitacional da Terra age sobre ela. Tudo no mundo funciona do mesmo modo: a matéria cria campos de força que deslocam outra matéria.

A física clássica reconhecia apenas dois campos — o eletromagnético e o gravitacional — deixando aberta a possibilidade de se descobrir outros campos. A física moderna acrescentou somente dois campos ao dueto clássico: *o campo forte,* que mantém unidos os núcleos atômicos, e o *campo fraco,* que destrói o núcleo em certos tipos de desintegração radioativa. O conhecimento atual afirma que esses campos são tudo o que a natureza necessita para produzir um universo como o nosso, e que, provavelmente, eles são um só, unidos do mesmo modo que a eletricidade e o magnetismo.

Um campo clássico é uma distribuição de

forças no espaço. O alcance de um campo é o raio de ação de suas forças. As três forças clássicas diminuem com o quadrado da distância, mas nunca chegam a zero: o alcance dessas forças clássicas é infinito. Não importa quão longe da Terra estejamos, a sua gravidade ainda nos puxa um pouco. Por outro lado, a força dos dois campos modernos está confinada ao núcleo atômico. Devido ao seu alcance reduzido, os campos de força fraco e forte foram os últimos a serem descobertos.

A fim de descrever o modo de funcionamento do mundo clássico, precisamos de dois tipos de leis: leis de movimento e leis de campo. As leis de movimento dizem como a matéria deverá deslocar-se num determinado campo de força. As leis de campo explicam o modo pelo qual cada campo depende de sua fonte material e como esse campo se estende no espaço.

No século XVII, Isaac Newton descobriu as leis do movimento da matéria. Os campos

de força deslocam a matéria segundo trajetórias prescritas com exatidão pelas leis de Newton. Essas leis são *deterministas:* uma dada situação sempre conduz a um resultado único. Preso em seus trilhos, o mundo não tem outra alternativa senão a de seguir um único caminho. O universo, segundo a segundo, como um gigantesco relógio, reproduz as inexoráveis leis de Newton; o seu futuro é tão fixo e imutável quanto o seu passado.

Além de suas leis do movimento, Newton descobriu a primei ra lei da física relacionada a um campo: a razão inversa dos quadrados no comportamento do campo de gravidade. Para completar o quadro clássico, só estavam faltando as leis da eletricidade e do magnetismo. Durante a guerra civil americana, o físico escocês James Clerk Maxwell preencheu essa lacuna, elaborando as leis que regem os campos elétrico e magnético. As leis de Maxwell estavam cheias de surpresas. Por exemplo: verificou-se

que a eletricidade e o magnetismo não eram dois campos separados, mas dois diferentes aspectos de um só campo eletromagnético. As leis de campo de Maxwell solveram, ainda, inesperadamente, um dos mais persistentes mistérios da física: a natureza intrínseca da luz.

A cada porção de matéria está anexado um campo cujo alcance se estende às estrelas distantes. Se fizermos tremer a matéria, faremos tremer o seu campo. O movimento num campo, como o movimento no leito de um lago, não fica fixado num ponto, mas, ao contrário, sai coleando tão rapidamente quanto possível. O estremecimento de um campo produz ondas e essas ondas caminham com uma certa velocidade.

As leis de Maxwell nos dizem como calcular a velocidade das ondas num campo eletromagnético. Essa velocidade depende inteiramente de dois fatos eletromagnéticos: a força entre dois ímãs e a força entre duas cargas elé-

tricas. Com base na intensidade das forças de atração magnética e elétrica, Maxwell calculou a velocidade com que deveríam se deslocar as ondas eletromagnéticas. Essa velocidade calculada era idêntica ao valor encontrado na medição da velocidade da luz. Maxwell supôs, então, que a luz seria uma onda eletromagnética de frequência extremamente alta. Antes de Maxwell, quem teria adivinhado que essa tênue radiância que nos enche os olhos teria algum parentesco com as impassíveis baterias ou magnetos industriais?

Indo mais além, Maxwell, supôs que deveriam existir, no espectro eletromagnético, ondas eletromagnéticas invisíveis, mais baixas e mais altas que a luz. A subsequente produção de ondas de rádio (luz de baixa frequência) por Heinrich Hertz, e a descoberta dos raios-X (luz de baixa frequência) por Roentgen, confirmaram a audaciosa suposição de Maxwell: a luz é um movimento ondulatório no campo eletro-

magnético. A descoberta de Maxwell, de que as cores que nos desciam os olhos, a agulha que guia o marinheiro, a pedra ímã, o relâmpago, as contrações elétricas dos músculos e do cérebro são, todas, manifestações de um único campo físico, foi o maior momento da física clássica.

O campo gravitacional, provavelmente, também se encrespa, mas as ondas de gravidade são demasiado fracas para influenciarem até mesmo o mais sensível medidor de gravidade. Um dos desafios para os físicos modernos é o desenvolvimento de instrumentos suficientemente sensíveis para detectar as ondas de gravidade.

A física clássica numa casca de noz: O universo consiste de nada mais que matéria e campos — e conhecemos as leis de ambos. O que um físico poderia querer maisΔ Contudo, parece que a pintura não estava perfeita. Quando pressionados, os físicos clássicos confessavam a existência de algumas manchas diminutas

que, segundo eles, poderiam ser tiradas com um pequeno esforço adicional. Havia, por exemplo, o enigma da radiação do corpo-negro.

POR QUE OS OBJETOS AQUECIDOS SE TORNAM RUBROSΔ

Objetos coloridos possuem uma cor intrínseca; objetos negros, não. Contudo, se aquecermos um objeto negro, ele adquirirá um certo fulgor. Durante gerações, os fundidores de aço aferiram a temperatura do forno por esse fulgor do corpo-negro. Eles sabem, por exemplo, que o ferro se torna vermelho-cereja por volta dos mil e trezentos graus. Para os físicos, o enigma do corpo-negro consiste em calcular a coloração desse fulgor para diferentes temperaturas.

Um corpo-negro é formado de pequenas porções de matéria. Quando uma dessas partículas se move, surgem ondas no campo eletromagnético que lhe está anexado — ondas

que nossos olhos interpretam como luz colorida. Quanto mais rapidamente as partículas se movem, maior é a frequência da luz emitida. Quando um objeto se torna mais quente, suas partículas componentes se movem com mais rapidez. Esse é o tipo de raciocínio que passa na cabeça de um físico clássico quando ele se dispõe a calcular a cor do brilho de um corpo-negro.

Os físicos clássicos pouco sabiam a respeito da natureza das partículas que emitem luz num bloco de ferro aquecido, mas assumiam que, como tudo mais no mundo, elas obedeciam às leis de Newton. Sabemos hoje que a luz é produzida por elétrons em movimento. Contudo, os elétrons, além de não obedecerem às leis clássicas, não obedecem, sequer, a um *tipo* clássico de lei — isto é, uma lei que rege o movimento dos objetos reais.

Durante um quarto de século após Maxwell ter anunciado a conexão luz-matéria, os físicos

atacaram o enigma do corpo-negro, obtendo sempre a mesma resposta: os corpos-negros deveriam ter um fulgor azul brilhante em todas as temperaturas.

Em 1900, quando começava o novo século, Max Planck que, contrariando o conselho de seu professor, se graduara em física, e não em música, atacou o enigma do corpo-negro. Como premissa simplificadora, ele decidiu não deixar que as partículas materiais vibrassem da maneira que quisessem; ao contrário, restringiu, artificialmente, as frequências das partículas, obrigando-as a seguir uma regra simples:

$$E = nhf$$

onde E é a energia das partículas, n é qualquer número inteiro, f é a frequência de vibração da partícula e h é uma constante a ser escolhida por Planck. A regra de Planck restringe a energia das partículas a certos múltiplos da frequên-

cia de vibração, como se a energia só surgisse em "moedas" de valor nominal *hf.* A constante de Planck, *h,* seria, mais tarde, denominada "quantum de ação", porque possui a dimensão de "energia x tempo", uma grandeza conhecida como "ação" na física clássica.

A premissa de Planck não estava justificada por nenhum raciocínio físico, e não passava de um artifício para facilitar o tratamento matemático da questão. Em seus cálculos posteriores, Planck tratou de remover aquela restrição, permitindo que a constante *h* tendesse para zero. Com isso, o valor da "moeda de energia" ficaria tão pequeno que, efetivamente, a partícula poderia, novamente, ter a energia que quisesse.

Planck verificou que, como todo mundo, obtinha o mesmo brilho azul quando *h* tendia para zero. Contudo, para sua surpresa, descobriu que, atribuindo a *h um valor particular,* os cálculos correspondiam exatamente à experimentação (e respaldavam a experiência dos

ferreiros de toda parte). O ferro aquecido só se torna rubro, mostrou Planck, quando existem partículas cuja energia é formada de "moedas" de determinado valor nominal. Os físicos delicadamente ignoraram o trabalho de Planck porque, embora o resultado fosse correto, não o consideravam um jogo limpo. Aquela curiosa restrição imposta à energia era totalmente estranha à física clássica. As leis de Newton permitiam que as partículas possuíssem a energia que quisessem.

OS TRÊS ARTIGOS DE ELNSTEIN

No ano de 1905, Albert Einstein, um judeu alemão que trabalhava na Suíça como obscuro funcionário do serviço de patentes, publicou três artigos no jornal alemão *Annalen der Physik* que causaram grande impacto na comunidade dos físicos. Cada artigo era uma bomba que abalava os alicerces da física. Qualquer um dos

três artigos, por si só, teria sido suficiente para confirmar o seu autor como um físico do mais alto nível. Três, de uma só vez, já sugerem inspiração divina.

O primeiro artigo de Einstein explicava o efeito fotoelétrico — o poder da luz para expulsar os elétrons de um metal — utilizando o novo quantum de ação, de Max Planck. A análise feita por Einstein mostrava a natureza não clássica da luz, de maneira tão inequívoca que os físicos já não poderiam ignorar o misterioso quantum. Planck dera o pontapé inicial nesse novo futebol quântico; Einstein fez o primeiro gol.

O segundo artigo de Einstein explicava o movimento browniano das partículas microscópicas em suspensão num líquido, e mostrava como se poderia resolver experimentalmente a antiquíssima questão da realidade dos átomos. O físico francês Jean Perrin realizou as experiências e estabeleceu, pela primeira vez, a prova

conclusiva da existência dos átomos.

O primeiro artigo levou os físicos a mergulharem de cabeça na Era Quântica; o segundo encerrou, de modo decisivo, uma das maiores discussões do século XIX. Einstein, porém, estava somente se preparando.

O terceiro artigo de Einstein alterou fundamentalmente nossas ideias comuns de tempo e espaço, noções que pareciam tão profundamente incrustadas na experiência humana a ponto de se tornarem inquestionáveis. Na nova visão criada por Einstein, as medições de comprimento e tempo não são absolutas, mas dependem da velocidade do observador. Por exemplo, duas pessoas movimentando-se uma em relação à outra, e observando o mesmo relógio, veem-no andando em marchas diferentes. Outras grandezas absolutas tomam o lugar do espaço e do tempo, principalmente a velocidade da luz, que Einstein afirmou ser a mesma para todos os observadores. A velocidade da luz é,

ainda, elevada â condição de velocidade limite do universo, a qual nenhum sinal pode exceder. A teoria especial da relatividade (como Einstein a denominou) teve profundas consequências para a física e para a filosofia, pois mostrou que algumas das nossas mais caras noções a respeito do mundo estão simplesmente erradas e devem ser substituídas por outras maneiras de pensar inteiramente novas.

Por ter revolucionado as ideias compatíveis com o bom senso, a relatividade de Einstein é, muitas vezes, considerada como parte da Nova Física, porém, estritamente falando, a relatividade pertence ao século XIX. Não obstante as suas noções bizarras sobre o espaço e o tempo, a teoria de Einstein não desafia a física clássica, mas complementa-a.

A física clássica está baseada em dois conjuntos de leis: as leis de Maxwell, relativas aos campos, e as leis de Newton, relativas ao movimento. Esses dois conjuntos de leis eram in-

compatíveis com o recém-descoberto fato de que, a despeito do movimento da Terra, a velocidade da luz permaneceria constante em qualquer direção. Alguma coisa, na física clássica, deveria ceder. Einstein conservou intactas as leis de Maxwell, mas substituiu as leis de Newton por suas próprias leis relativistas do movimento. Essas novas leis tornaram a velocidade da luz constante para todos os observadores. Uma das consequências da revisão de Newton feita por Einstein é a sua famosa relação $E = mc^2$. As leis de campo, de Maxwell, juntamente com as leis relativistas do movimento descrevem de modo completo e consistente todos os movimentos clássicos, mesmo aqueles que envolvem altas velocidades.

Por ser a relatividade, realmente, parte da física clássica, a maioria dos físicos, uma vez recuperados do choque inicial, aprenderam a aceitá-la como uma extensão natural do bom senso. A despeito da sua revisão radical do es-

paço e do tempo, a postura de
Einstein ante a realidade não é diferente da de Newton: os campos são reais; é com a matéria real que lidamos. A relatividade especial não provocou qualquer crise de realidade na física.

Ironicamente, no mesmo ano em que aperfeiçoou a imagem clássica do mundo, Einstein deu início a uma linha de pensamento (seu primeiro artigo) que iria destruí-la completamente. Com sua explicação do efeito fotoelétrico em termos de quanta de luz, Einstein atacou a física clássica, não em algum obscuro ponto de sua margem, e sim exatamente em seu centro. Einstein pôs em cheque o entendimento que os físicos tinham da luz, uma questão que se acreditava ter sido encerrada por Maxwell antes de Einstein nascer.

O EFEITO FOTOELÉTRICO: COMO A LUZ AGE SOBRE OS ELÉTRONS DE UM METAL?

Consideremos um raio de luz iluminando um pedaço de metal. Os físicos clássicos imaginavam que os elétrons do metal estavam suspensos no campo eletromagnético, como nadadores flutuando em águas calmas. A luz seria uma onda nesse oceano eletromagnético, capaz de atirar para fora os elétrons, como as ondas do mar podem atirar à praia os nadadores. Quanto maior a onda, mais violentamente o nadador/elétron é atirado para fora da água.

Contudo, as experiências fotoelétricas não respeitam essa analogia simples. Para a luz de uma determinada frequência, a energia do elétron ejetado é sempre a mesma, quer se trate de uma luz intensa ou de um tênue raio de luz. Quando se trata de um raio intenso, é maior o número de elétrons ejetados, mas a energia de cada um é a mesma. Um fato como este seria muito estranho, caso ocorresse na praia: uma ligeira encrespação e uma grande vaga nos atira-

riam sobre a areia com a mesma força. A grande vaga apenas atiraria mais gente para fora.

Aumentar a intensidade da luz não é o caminho para se conseguir que a luz comunique uma maior quantidade de sua energia ao elétron ejetado. Ao invés disso, deve-se aumentar a sua frequência . A energia da luz depende, evidentemente da sua cor, não da sua intensidade. A luz azul (alta frequência) atinge os elétrons com mais violência do que a luz vermelha (baixa frequência). A experiência mostra que quanto mais alta for a frequência, maior será o impacto. Na praia, isso significaria que pequenas e rápidas encrespações da água, próximas da areia, são mais perigosas - podem provocar um tranco mais forte - do que vagas imensas de baixa frequência.

Einstein esclareceu esses estranhos fatos relacionados às "ondas" de luz através de uma simples suposição: a luz se comporta como uma chuva de partículas, tendo cada uma a

energia E dada pela expressão de Planck:

$$E = hf$$

onde f é a frequência da luz e h é a constante de ação de Planck - o valor particular que Planck precisou introduzir para calcular corretamente o brilho do corpo-negro.

Mais de um século de experiências haviam mostrado que a luz era uma onda. A bem-sucedida descrição teórica de Maxwell havia mesmo identificado o campo eletromagnético como agente gerador das ondas. Einstein, entretanto, mostrou que, quando age sobre um metal, a luz se parece com uma chuva de partículas divididas em "moedas de energia". O conjunto dessas experiências indica que, de um modo difícil de visualizar, a luz se comporta, em determinadas situações, como uma onda, e em outras, como partículas.

Três propriedades da onda são particular-

mente incompatíveis com a noção de partícula: 1. Uma onda pode se estender sobre uma área imensa, enquanto a partícula está confinada em uma região diminuta. 2. Uma onda pode ser facilmente dividida numa variedade infinita de direções, enquanto a trajetória da partícula está confinada em uma única direção. 3. Duas ondas podem se interpenetrar, como fantasmas, e emergir inalteradas, enquanto que duas partículas entrariam em colisão. Partículas e ondas parecem ter propriedades diferentes e irreconciliáveis, mas a natureza da luz é tal que a torna capaz de combinar essas propriedades contraditórias de maneira harmoniosa.

O EFEITO COMPTON: COMO A LUZ AGE SOBRE OS ELÉTRONS DE UM GÁS?

As partículas de luz de Einstein (apelidadas "fótons") surgiram novamente em uma experiência realizada pelo físico americano Arthur

Holly Compton. No efeito fotoelétrico, um fóton entra, mas nenhum fóton sai: o quantum de luz transfere toda a sua energia para o elétron. Ao invés de estudar a absorção da luz, Compton examinou a difusão da luz. Fazendo incidir o raio-X (luz de alta frequência) num gás, onde os elétrons estão frouxamente ligados, Compton pôde detectar tanto a ejeção do elétron quanto o ricochete do fóton. Essa experiência mostrou que a luz se comporta exatamente como uma partícula ricocheteando num elétron, desde que se atribua a essa partícula uma quantidade de movimento p calculada segundo a regra quântica:

$$p = hk$$

onde k é a frequência espacial da luz — o número de comprimentos de onda que cabem em um centímetro — e *h é a* constante de ação de Planck. Na experiência de Compton, a luz se

comporta, em todo o universo, como uma diminuta bola de bilhar com quantidades de movimento e energia determinadas pelas regras mágicas do quantum. Pode-se entrar com uma determinada frequência da luz, fazer um cálculo semelhante ao das bolas de bilhar, e prever a colocação das laterais que receberão o elétron ejetado e o fóton ricocheteado. Este último na caçapa.

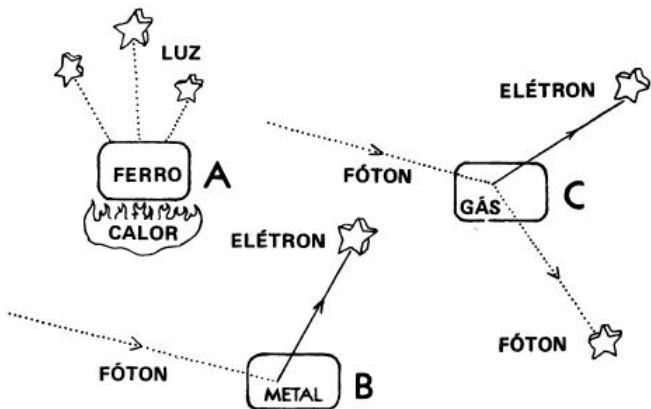



Fig. 3.1. Três experiências que fizeram uma revolução. A. Radiação do corpo-negro; B. O efeito fotoelétrico; C. O efeito Compton, todas indicando que a luz é constituída de partículas, e todas conflitantes com numerosas experiências óticas do século XIX, em que a luz age como uma onda. Aqui, e em todo o livro, as entidades quânticas elementares, tais como elétrons e fótons, são representadas por estrelas de cinco pontas.

DE BROGLIE PREVÊ A NATUREZA ONDULATÓRIA DA MATÉRIA

Enquanto os físicos tratavam de resolver o problema das propriedades aparentemente contraditórias da luz, outra tempestade se armava em

Paris. O aristocrata francês Louis de Broglie apresentara uma estranha tese de doutorado aos seus professores de física da Sorbonne. Mediante argumentos que pareceram dúbios para a banca examinadora, de Broglie sustentava que cada partícula de matéria estaria associada a uma onda cujas frequências temporais e espaciais f e k seriam determinadas pela fórmula de Planck- Einstein $E = hf$ e pela relação de Compton $p = hk$, onde E e p seriam, respectivamente, a energia e a quantidade de movimento da partícula. De Broglie argumentava que, assim como Einstein mostrara que as ondas de luz possuíam propriedades inerentes às partículas, estas também poderiam ter propriedades ondulatórias.

Era uma situação delicada. O príncipe de Broglie tratara com seriedade a sua proposta, mas a conclusão era evidentemente absurda. O professor que orientava de Broglie em sua tese decidiu enviar a Einstein uma cópia da mesma.

Einstein apoiou entusiasticamente a ideia de de Broglie, e o príncipe obteve o seu Ph.D. Seis anos mais tarde, de Broglie receberia o prêmio Nobel por sua ideia absurda. Nesse meio tempo, o "comprimento de onda de de Broglie", de um pedaço de matéria — o elétron — havia sido medido nos Laboratórios Bell, pelos americanos Davisson e Germer.

A profecia de de Broglie, de que a matéria mostraria propriedades ondulatórias, foi um passo importante para a nossa compreensão da realidade quântica. A física clássica construiu o seu mundo a partir de dois tipos de entidades: matéria e campo (também conhecidas como partícula e onda). Planck, Einstein e Compton mostraram que as ondas (pelo menos as ondas de luz) também eram partículas. De Broglie estava dizendo que as partículas também eram ondas. Os novos fatos quânticos destroem a outrora nítida distinção entre matéria e campo. Com duas mágicas sentenças quânticas, pode-

mos nos trasladar, à vontade, das grandezas inerentes à partícula, energia e quantidade de movimento *(E* e *p*), para as grandezas inerentes às ondas, frequência temporal e espacial *(f* e *k),* transformando a matéria em campo, e vice-versa. É como se começássemos a olhar o mundo como se tudo fosse feito de uma só substancia — chamemo-la "substância quântica" — que combinasse, de uma vez, a partícula e a onda, de um modo peculiar todo seu.

Desfazendo a distinção entre matéria e campo, os físicos quânticos realizaram um sonho dos antigos gregos: a sugestão de que, sob a variedade de aparências, o mundo seria, em última análise, constituído de uma só substância. Para alguns filósofos o mundo era Todo Fogo, para outros, Todo Água. Acreditamos, hoje, que o mundo é Todo Substância Quântica.

O mundo é uma só substância. Por mais satisfatória que esta descoberta possa ser para os filósofos, é profundamente penosa para os fí-

sicos, porquanto eles não entendem a natureza dessa substância. Se a substância quântica é tudo o que existe e se não entendemos essa substância, nossa ignorância é completa.

O físico francês Oliver Costa Beauregard chama de *Era Paléoquantique* ou Idade da Pedra Quântica o quarto de século decorrido entre a descoberta do quantum de ação, por Planck, em 1900, até a formulação da mecânica matricial, por Heisenberg, em 1925. Para explicar os fatos quânticos, durante aqueles tempos confusos, os físicos juntavam fragmentos da física clássica a determinadas noções quânticas (principalmente as duas sentenças mágicas que estabelecem a ligação entre os atributos da onda e da partícula), de várias maneiras inteligentes, mas essencialmente aleatórias.

O ponto alto das técnicas da Idade da Pedra Quântica foi o modelo idealizado por Bohr para o átomo de hidrogênio, que explicava os detalhes principais do espectro do hidrogênio —

um problema que a física clássica não poderia sequer tocar. Bohr, contudo, estava consciente de que o seu sucesso se devia, em grande parte, a um inspirado trabalho de adivinhação. Durante aquele período de transição, os físicos precisavam de um método confiável e consistente — leis quânticas comparáveis às leis clássicas de Newton e Maxwell — para lidarem com os fatos quânticos.

Os físicos necessitavam fortemente de uma teoria quântica que os ajudasse a vencer a ignorância da Idade da Pedra quântica. A necessidade era tão intensa, o momento tão próprio, que, num único ano, não apenas uma ou duas, mas três teorias quânticas distintas surgiram onde antes não havia nenhuma.

O NASCIMENTO DA TEORIA QUÂNTICA

Werner Heisenberg foi o primeiro. No verão de 1905, Heisenberg estava se recuperando de

um ataque de febre do feno na ilha de Heligoland, Mar do Norte. Inspirado em suas conversas com Bohr sobre os mistérios do quantum, Heisenberg, em seu retiro na ilha, subitamente juntou todas as peças e criou a mecânica matricial — a primeira teoria quântica surgida no mundo.

Teoria quântica é um método de representação matemática da substância quântica; um modelo do mundo feito com símbolos. O que a matemática faz no papel, a substância quântica faz no mundo exterior. A teoria quântica precisa conter, pelo menos: 1. alguma grandeza matemática que corresponda à substância quântica; 2. uma lei que descreva o modo pelo qual essa grandeza sofre alterações; 3. uma regra de correspondência para que se possa traduzir, em termos de atividades do mundo, os símbolos teóricos.

Teoria Quântica # 1: Heisenberg represen-

ta o sistema quântico através de um conjunto de matrizes; daí o nome de mecânica matricial. Uma matriz é um arranjo de números formando um quadrado, como a tabela de quilometragem de um mapa rodoviário que indica as distâncias entre várias cidades. Cada matriz de Heisenberg representa um atributo diferente, tal como a energia ou a quantidade de movimento, sendo as cidades da tabela de quilometragem substituídas por valores particulares daquele atributo. As diagonais da matriz mostram a probabilidade de que o sistema possua aquele valor particular do atributo, e os elementos fora da diagonal representam a intensidade das conexões não clássicas entre os valores possíveis daquele atributo. Desse modo, a quantidade de movimento p de um elétron não é representada por um número, como na física clássica, mas por uma dessas matrizes quadradas. O mesmo acontece com a posição x, a energia E, ou qualquer outro atributo do sistema: são todos repre-

sentados por matrizes. A evolução dessas matrizes segue uma lei especial de movimento que lembra a lei de Newton, mas contém diferenças que lhe são peculiares. Uma grande diferença é que, ao contrário dos números, as matrizes não são comutativas. Isso significa que faz diferença a ordem em que as matrizes são multiplicadas. Em particular, se *p* e *x* são arranjos quadrados, o produto de *p* por x não é igual ao produto de x por p.

No inverno de 1925, os físicos Erwin Schrödinger e Paul Dirac, o primeiro austríaco e o segundo inglês, criaram, independentemente, mais duas teorias quânticas.

Teoria Quântica # 2: Schrödinger representou a substância quântica através de uma forma ondulatória e formulou as leis quânticas do movimento (equação de Schrödinger), à qual uma tal forma ondulatória deve obedecer. A princípio, Schrödinger supôs que suas ondas

seriam ondas clássicas, tão reais quanto as vibrações eletromagnéticas de Maxwell, mas, conforme veremos, o *status* de realidade das ondas de Schrödinger é extremamente duvidoso. Por apresentar a substância quântica sob uma imagem ondulatória, a teoria de Schrödinger é denominada mecânica ondulatória.

Teoria Quântica # 3: Dirac simbolizou a substância quântica como uma seta (ou vetor) apontando em uma determinada direção num espaço abstrato multidimensional. O movimento da substância quântica corresponde a uma rotação dessa seta. Para descrever a maneira pela qual a seta gira, torna-se necessário estabelecer algum tipo de coordenadas sobre o espaço a que pertence a seta (análogas às linhas de longitude e latitude sobre a superfície da Terra). Porém, como na Terra existe um alto grau de liberdade no modo de se traçar essas linhas imaginárias. Dependendo da escolha das

coordenadas, pode-se obter, para a mesma seta, descrições quânticas que, de maneira superficial, podem parecer muito diferentes. Grande parte da teoria de Dirac diz respeito ao modo de se fazer a conversão de um para outro sistema de coordenadas, i.e., como obter a *transformada* de duas descrições, aparentemente diferentes, da mesma seta em movimento giratório. Devido à ênfase dada às descrições variantes, Dirac deu ao seu esquema o nome de "teoria da transformação".

A física quântica emergiu da Idade da Pedra com uma superabundância de teorias, todas pretendendo explicar o mundo. Como se verá, as três teorias estavam corretas. Dirac conseguiu mostrar que tanto a teoria de Heisenberg quanto a de Schrödinger eram casos particulares da sua versão de uma teoria quântica, calcada na imagem da seta girante. A seta de Dirac se assemelha a um agrupamento de matrizes ou a uma onda, dependendo do sistema de coorde-

nadas escolhido. Assim, a despeito de suas diferentes imagens da substância quântica, as três teorias possuem conteúdos idênticos. Percorrendo trajetórias diversas, Heisenberg, Schrödinger e Dirac convergiram sobre a mesma explanação, partindo de três diferentes direções.

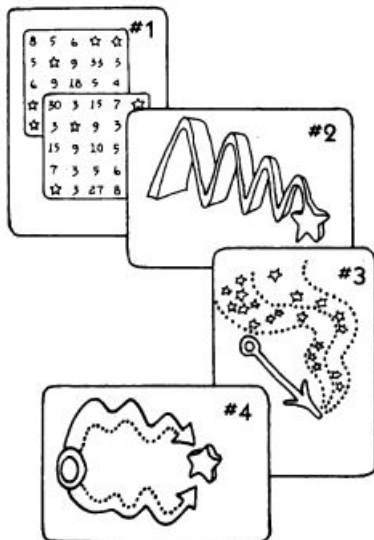



Fig. 3.2. Quatro versões da teoria quântica, na ordem em que foram descobertas: 1. mecânica matricial, de Heisenberg; 2. mecânica ondulatória, de Schrödinger; 3. teoria da transformação, de Dirac; 4. abordagem da adição de histórias, de Feynman. Todas quatro chegam aos mesmos resultados.

Por que parar nessas três? A liberdade de escolha das coordenadas significa que a teoria quântica pode descrever a mesma situação física em uma variedade de linguagens matemáticas. Os físicos exploram essa característica da teoria escolhendo, para cada novo problema, a linguagem mais apropriada. Os físicos formados na era pré-quântica preferiram a imagem ondulatória de Schrödinger por causa do parentesco desta com a física clássica. No entanto, os físicos jovens, criados à sombra da teoria da transformação, logo desenvolveram um pendor para as linguagens abstratas, afastadas da tradição clássica.

Quando receberam de Heisenberg, Schrödinger e Dirac a tríplice revelação, os físicos diligentemente começaram a testar a nova teoria, confrontando-a com os eventos do mundo exterior. Neste ponto, a história do quantum toma dois caminhos: o relato daqueles que utilizam a teoria quântica como uma ferramenta simbóli-

ca para manipular o mundo, e a história dos que veem a teoria quântica como uma janela aberta para a realidade, através da qual se poderá perceber a natureza íntima do universo. Em sua maioria, os físicos tornaram-se fabricantes de ferramentas; poucos, na era trepidante do quantum, encontraram tempo livre para sair em busca da "realidade". Muito se escreveu sobre o sucesso prático da teoria quântica em todos os domínios, do quark ao quasar. Em *A realidade quântica*, sigo pela trilha menos trafegada.

A Teoria Quântica foi criada para lidar com um problema: a interação da luz com os átomos. Mas, uma vez solucionado o problema atômico, os físicos logo passaram a testá-la em outros mistérios: a natureza dos sólidos, líquidos e gases, a estrutura do minúsculo núcleo escondido no interior do átomo, e a natureza das entidades subnucleares. Alguns dispuseram-se a ver, sob os símbolos, uma realidade mais profunda, mas a maioria dos físicos

utilizou a teoria quântica do mesmo modo que um punhado de adolescentes utilizaria um novo e potente automóvel, conduzindo-o imprudentemente na velocidade máxima, até alguma coisa se partir. Mas a teoria quântica é uma máquina resistente; para qualquer direção que viremos o volante, essa teoria nos levará até lá.

A física clássica tinha suas falhas — experiências que ela não podia explicar — que eventualmente a levaram à ruína. Até onde podemos prever, não há experiência que a teoria quântica não possa explicar, pelo menos em princípio. A teoria quântica é o par perfeito para os fatos quânticos. Embora os físicos tenham dirigido a teoria quântica para regiões distantes dos domínios do átomo, onde ela nasceu, não há no horizonte qualquer indício de que ela irá jamais sucumbir.

Com o sucesso prático sem precedentes da teoria quântica e o poderoso controle sobre a natureza que esse sucesso acarretou, a física

transformou-se em um grande negócio, uma arma para o estado. A pesquisa da realidade logo foi eclipsada por uma orgia de aplicações.

Os físicos nem sempre tinham-se mostrado tão cautelosos em relação à realidade. No decorrer da primeira década da era quântica (1925-1935) surgiram controvérsias a respeito da relação entre a teoria quântica e a realidade. Por exemplo, esse período testemunhou os famosos debates entre Bohr e Einstein. Contudo, a visão propagada por Heisenberg, Bohr e Max Bom, de Göttingen, acabou prevalecendo e se consolidou na doutrina oficial conhecida como interpretação de Copenhague, e seus seguidores afirmam que não há nenhuma realidade profunda (RQ #1).

Alguns físicos comparam a linha de pensamento de Copenhague ao pragmatismo - uma maneira de abordar os fenômenos, que qualifico como sendo do tipo livro-de-receitas-culinárias. A teoria quântica, segundo os pragmatis-

tas, é nada mais do que uma receita a ser cotejada com as aparências. A teoria nada mais nos diz sobre a realidade, e não devemos esperar que ela o faça. A física trata de acomodar a matemática às medições; tudo o mais será especulação sem fundamento. Os pragmatistas concordam com a frase de Bohr: "É um erro pensar que a tarefa da física é descobrir como ***é a*** natureza. A física se preocupa com o que podemos *dizer* a respeito da natureza".

Todas as teorias, desde as que tratam de corridas de cavalos até as que se referem a modelos para a economia norte-americana, possuem um pequeno núcleo pragmático que se revela na questão: a matemática se ajusta aos fatos? Todas as teorias são, no mínimo, pragmáticas. Há pessoas que são pragmáticas porque imaginam que podem evitar a "filosofia" prendendo-se às supostas certezas da matemática e das experiências.

Bohr, em minha opinião, foi mais do que

um simples pragmatista. Ele fez afirmações claras a respeito da ausência de uma realidade subjacente na teoria quântica não com base em um desgosto pela filosofia, mas utilizando argumentos retirados da própria estrutura da teoria. Todas as teorias são pragmáticas; algumas possuem uma realidade subjacente. Contudo, segundo Bohr, a teoria quântica não está entre estas. Enquanto conservar a forma descoberta por Heisenberg, Schrödinger e Dirac, a teoria quântica não será passível de uma reinterpretação em termos de uma realidade mais profunda.

O reconhecimento da doutrina de Copenhague foi um importante marco na pesquisa da realidade porque, ao mesmo tempo em que representava o ponto de vista da maioria, ela preconizava o encerramento do debate sobre a questão da realidade. Como diz o físico Murray Gell-Mann, do Instituto de Tecnologia da Califórnia: "Niels Bohr fez a lavagem cerebral de

toda uma geração de físicos, levando-os a pensar que o serviço já fora feito cinquenta anos antes."

Dois outros marcos relativos à interpretação de Copenhague são o princípio da incerteza, de Heisenberg, e o princípio da complementaridade, de Bohr. Em conjunto, eles expressam restrições básicas que a natureza parece impor a qualquer ato de medida. Veremos como Bohr utiliza essas limitações fundamentais da observação para afirmar que nem a medida, nem a teoria, podem nos pôr em contato com a realidade profunda.

A despeito da linguagem extremada de alguns realistas quânticos, nenhum físico afirma a inexistência dos elétrons. O efeito deles se torna visível a cada vez que se liga a TV. Se os elétrons não existem, o que forma a imagem na tela?

O que está em jogo na questão da realidade quântica não é a existência dos elétrons, mas

a maneira pela qual os elétrons detêm os seus principais atributos. Os físicos clássicos imaginavam que todas as partículas possuíssem a cada momento uma posição e uma quantidade de movimento definidos; de modo semelhante, os campos possuiriam, em cada ponto, uma intensidade determinada. Caso concordemos em dar o nome de "objeto comum" a todas as entidades — partícula, campo, maçã, ou galáxia — que possuem seus atributos de maneira inata, a mensagem fundamental da física clássica será a de que o mundo físico é constituído de nada mais que objetos comuns.

Por outro lado, a teoria quântica indica que o mundo não é formado de objetos comuns. O elétron, e as demais entidades quânticas não possuem, de maneira inata, todos os seus atributos. O elétron possui, de fato, certas propriedades inatas — massa, carga e *spin* [Quantidade de movimento angular intrínseco, conhecida, em física, por spin. A magnitude do spin é um atributo estático

(grandeza constante) - N. do T.], por exemplo — que servem para distingui-lo de outros tipos de entidades quânticas. O valor medido dessas propriedades é o mesmo para todos os elétrons, sob quaisquer condições de mensuração. Com respeito a esses atributos especiais, até mesmo o elétron se comporta como um objeto comum.

Contudo, todas as outras propriedades, notadamente a posição e a quantidade de movimento, que, segundo se pensava, as partículas clássicas possuiriam de maneira inata, já não podem ser atribuídas incondicionalmente ao elétron. Esses atributos — denominados "dinâmicos", para distingui-los dos atributos "estáticos", massa, carga e *spin* — não pertencem ao elétron em si, mas parecem ser criados, em parte, pelo contexto da mensuração do elétron. A maneira pela qual um elétron adquire, e possui, os seus *atributos dinâmicos* é o tema da questão da realidade quântica. O fato importante é que, nos dias atuais, ninguém sabe realmente

como um elétron, ou qualquer outra entidade quântica, possui os seus atributos dinâmicos.

Segundo a interpretação de Copenhague, os atributos dinâmicos do elétron são *contextuais:* os atributos que o elétron parece ter dependem de como ele é medido. Os assim chamados atributos de um elétron pertencem conjuntamente ao elétron e ao instrumento de medida. Quando um adepto da linha de Copenhague diz que "não há nenhuma realidade profunda", ele quer dizer que não há nenhuma posição oculta mensurável, que o elétron "realmente tenha" quando não está sendo medido. Como a posição é um atributo que pertence conjuntamente ao elétron e ao instrumento que o mede, quando se retira o instrumento de medida, retira-se também a posição do elétron.

Um exemplo de atributo contextual é a cor de um objeto comum. A cor não é um atributo inato, mas depende da qualidade da iluminação e de outros aspectos da situação visual. Os co-

merciantes exploram a natureza contextual do atributo cor expondo, por exemplo, carnes, legumes e verduras sob luzes coloridas que tornam suas cores mais atrativas do que se estivessem sob a luz branca da realidade comum. Embora a cor do bife não seja um atributo inato, ela se baseia num atributo intrínseco do bife: o espectro de absorção da carne. A conjugação entre o espectro de absorção (inato da carne), o espectro de emissão (inato da luz que ilumina o balcão) e a resposta espectral (inata do olho humano) determina o atributo cor da carne. A alteração de um dos elementos desse trio de atributos inatos, alterará a cor da carne que é percebida.

Existirá a possibilidade de que a posição de um elétron seja semelhante à cor de um bife — isto é, um atributo contextual baseado em atributos mais profundos que não sejam contextuais? Quando um adepto da linha de Copenhague diz que "não há nenhuma realidade profun-

da", ele quer dizer que um elétron não é como um bife: não existe qualquer atributo inato que explique a dependência da posição e da quantidade de movimento do elétron em relação à medição. Quando se retira o instrumento de medida, o elétron indubitavelmente continuará existindo, mas não possuirá qualquer atributo dinâmico; particularmente, não possuirá posição e movimento definidos. Não podemos imaginar um tal estado de existência, mas a natureza não parece ter dificuldade para produzir tais entidades. Na verdade, é dessas entidades que o mundo é constituído.

A cor de um bife pode ser contextual, mas na maioria dos ambientes, ela parece vermelha. Enquanto tivermos em mente os limites desta afirmação, estaremos autorizados a dizer que o bife é vermelho. Em outras palavras, a cor é *quase* um atributo inato. Mas, na realidade, não é. Do mesmo modo, desde que não pressionemos os seus limites, o elétron parecerá ter uma

posição e uma quantidade de movimento definidas em todos os momentos. Os elétrons do tubo de imagem da TV, por exemplo, desde que não sejam forçados a passar por orifícios diminutos, parecerão comportar-se como objetos clássicos. Em outras palavras, os atributos dinâmicos do elétron são *quase* inatos. O enorme sucesso da física clássica dependeu do seguinte fato: as entidades que constituem o mundo são quase objetos comuns. Mas, na realidade, não são.

A BÍBLIA QUÂNTICA DE VON NEUMANN

Em 1932, o eminente matemático John von Neumann publicou a sua análise definitiva da teoria quântica, *Die Grundlagen* (Os fundamentos), que é a nossa bíblia quântica. Nesse livro influente, von Neumann dá à teoria quântica uma sólida base matemática e aborda, de

maneira altamente lógica, vários assuntos relacionados à realidade. Von Neumann propõe o famoso problema da medição quântica que, conforme veremos, está no âmago da questão da realidade quântica. É lícito afirmar que, se pudéssemos dizer o que verdadeiramente acontece em uma *medição,* saberiamos tudo que diz respeito à realidade física. Em razão de sua visão peculiar da medição, von Neumann é, muitas vezes, considerado o patrono da escola da realidade criada pela consciência (RQ # 7).

No *Die Grundlagen,* von Neumann examina a afirmação dos neo-realistas, segundo a qual uma *realidade comum* se oculta sob os fatos quânticos e, numa curta e formal argumentação (conhecida entre os pesquisadores da realidade como "a prova de von Neumann"), conclui que a existência de uma tal realidade é matematicamente incompatível com a teoria quântica. A prova de von Neumann foi amplamente considerada como uma confirmação da linha

de pensamento de Bohr, adotada na interpretação de Copenhague: não há nenhuma realidade profunda, e seria fútil procurá-la.

O que von Neumann mostrou foi que, se admitirmos que os elétrons são objetos comuns, ou constituídos de objetos comuns — entidades com atributos dinâmicos inatos — o comportamento desses objetos deverá contradizer as previsões da teoria quântica. Além disso, se admitirmos que os elétrons possuem atributos contextuais, derivados de objetos comuns, inacessíveis à medição, mas cujos atributos inatos combinam "de maneira razoável" para simular o comportamento do elétron que depende da medição, essas entidades deverão, também, desmentir as previsões da teoria quântica. Assim, de acordo com a bíblia quântica, *os elétrons não podem ser objetos comuns, nem podem ser constituídos de objetos comuns (atualmente não observáveis).* Partindo tão-somente da forma matemática da teoria quântica, von

Neumann provou que esta é incompatível com a existência real de entidades que possuem atributos próprios.

Durante mais de um quarto de século, a autoridade de von Neumann refreou o entusiasmo pela pesquisa da realidade. Por que procurar uma realidade comum oculta sob a teoria quântica, quando o maior matemático do mundo afirma que tal coisa é impossível?

Contudo, em 1952, a despeito da prova de von Neumann, David Bohm fez o impossível: construiu um modelo de elétron com atributos inatos cujo comportamento se harmoniza com as previsões da teoria quântica.

O MODELO DE BOHM PARA O ELÉTRON COMO OBJETO COMUM

Bohm nasceu na Pensilvânia e estudou física em Berkeley, sob a orientação de J. Robert Oppenheimer, que, por sua vez, aprendera a teoria

quântica em Copenhague com o próprio Bohr. Quando terminou os estudos, Bohm foi ser professor em Princeton e decidiu clarear o pensamento escrevendo um livro didático sobre a teoria quântica.

O livro de Bohm, *Quantum Theory,* é apreciado pelos estudantes por ser redigido numa linguagem fácil e constituir um guia simples para os cálculos da mecânica quântica, além de conter discussões incomuns e detalhadas sobre a questão da realidade. Tal como seu professor, Bohm era um leal adepto da escola de Copenhague; seu tratamento da questão da realidade segue a linha de Bohr. No lugar da imposição altamente matemática utilizada por von Neumann contra a realidade comum, Bohm utilizou argumentos informais para chegar à mesma conclusão. Em *Quantum Theory,* Bohm, tal como Heisenberg, Bohr e von Neumann, afirma que *os elétrons não são coisas.*

Em 1951, David Bohm entrou na luta com

a realidade política americana, recusando-se a testemunhar contra Oppenheimer perante a Comissão de Atividades Antiamericanas do senador Joseph McCarthy. Perdeu seu emprego em Princeton e nunca mais ensinou nos Estados Unidos; mudou-se primeiramente para o Brasil e, finalmente, estabeleceu-se em Londres.

Por volta dessa época, suas conversações com Einstein convenceram-no de que, a despeito do que dissera em seu livro e do que von Neumann provara, não seria impossível chegar-se a uma interpretação da teoria quântica compatível com a realidade comum. Em 1952, Bohm construiu um modelo para o elétron de acordo com essa ideia. No modelo de Bohm, o elétron é uma partícula e possui, em todos os momentos, uma posição e uma quantidade de movimento definidas. Além disso, cada elétron está associado a um novo campo — a chamada "onda-piloto" — que governa os seus deslocamentos segundo uma nova lei do

movimento. Tanto a onda como a partícula são reais — nada de ondas fictícias agindo por procuração — mas a onda-piloto é invisível, sendo observável somente de modo indireto, através de seus efeitos sobre o elétron a que está associada. No modelo de Bohm, a substância quântica não é uma substância única, combinando os aspectos da onda e da partícula, mas duas entidades separadas: uma onda real e uma partícula real.

A onda-piloto, agindo como uma espécie de sonda ambiental, muda sua forma instantaneamente sempre que uma alteração ocorre em qualquer parte do mundo. Em seguida, a onda-piloto comunica ao elétron essa alteração, e este, por sua vez, altera a sua posição e a sua quantidade de movimento. Quando se faz um determinado tipo de medição, a onda-piloto tem uma forma; quando se faz um outro tipo de medição, a onda-piloto assume outra forma. Para diferentes tipos de medição, o elétron ad-

quire atributos diferentes, porque a sua onda-piloto é diferente. Desse modo, o modelo de Bohm simula o comportamento contextual do elétron utilizando entidades (onda-piloto e partícula) cujos atributos não são contextuais. Os atributos do elétron são inatos, mas parecem ser contextuais porque a onipresente onda-piloto torna esses atributos imediata e delicadamente sensíveis a todos os detalhes do seu meio ambiente, inclusive ao tipo de medição que se está preparando para executar.

A noção de que a teoria quântica poderia ser explicada em termos de uma onda comum guiando uma partícula comum surgira com o príncipe de Broglie nos últimos anos da década de 20. Tendo encontrado sérias dificuldades matemáticas, de Broglie abandonou o seu modelo em favor da dominante doutrina de Copenhague. Um quarto de século mais tarde, David Bohm mostrava como o conceito de partícula-e-onda poderia ser utilizado para produzir uma

imagem consistente dos fatos quânticos.

O modelo da onda-piloto de Bohm fez renascer as esperanças dos neorrealistas de que a teoria quântica poderia ser explicada em termos de objetos comuns. No entanto, o modelo de Bohm sofre de um mal que lhe é peculiar: para que o modelo funcione, sempre que alguma alteração ocorre em algum lugar, a onda-piloto deve comunicar, instantaneamente, ao elétron essa alteração, o que exige uma sinalização mais rápida do que a luz. O fato de que os sinais mais rápidos do que a luz estão proibidos pela teoria especial da relatividade, de Einstein, pesa fortemente contra o modelo de Bohm, que nunca conseguiu livrá-lo dessa característica desfavorável. Devido à natureza um tanto artificiosa do seu modelo e à presença de influências mais rápidas do que a luz, Bohm via-o como um mero esboço, uma demonstração concreta de que, na verdade, é possível construir-se, com a realidade comum, um mo-

delo para a realidade quântica. Encorajado com esse sucesso inicial, Bohm persistiu na busca de uma melhor imagem para a realidade que ele acreditava estar oculta sob os fatos quânticos.

O TEOREMA DA INTERCONECTABILIDADE DE BELL

Em 1964, o físico irlandês John Stewart Bell, que trabalhava para o CERN — Conseil Européen pour Recherches Nucleaires — o centro europeu de aceleração, localizado em Genebra, na Suíça, tirou uma licença-prêmio e, deixando o mundo vertiginoso da física de alta energia, foi explorar os atalhos tranquilos da realidade quântica. A primeira indagação de Bell foi: como fora Bohm capaz de construir um modelo de realidade comum para o elétron quando von Neumann provara que ninguém poderia jamais fazê-loΔ O modelo de Bohm conseguira, de fato, fazer aquilo que se propusera: uma reprodu-

ção dos resultados da teoria quântica utilizando uma realidade feita de nada mais que objetos comuns. Então, a falha deveria estar não no modelo de Bohm, mas na prova de von Neumann.

Bell estudou cuidadosamente essa prova na versão original e em numerosas variações que outros físicos teóricos haviam produzido desde a publicação da bíblia quântica, e conseguiu descobrir a falha que permite a existência do modelo de realidade comum de Bohm.

Von Neumann e seus colegas haviam mostrado que nenhum esquema em que objetos comuns combinam entre si, "de maneira razoável", pode reproduzir os resultados da teoria quântica. Bell mostrou que a noção, de von Neumann, do que seria uma maneira razoável era demasiado restritiva. Particularmente, von Neumann não teria considerado "razoáveis" os elétrons que pudessem ajustar seus atributos através de um Campo invisível capaz de sentir

a configuração do instrumento de medida. O modelo de Bohm, baseado em elétrons adaptáveis ao contexto, não é "razoável", e por isso escapa à prova de Neumann. O fato de se terem passado trinta anos para que essa falha fosse descoberta dá a medida, tanto da autoridade de von Neumann, quanto do ritmo lento da pesquisa da realidade.

Enquanto examinava a prova de von Neumann, Bell conjeturava sobre a possibilidade de se construir um argumento verdadeiramente inabalável, que estabelecesse rígidos limites para os tipos de realidade que podem fundamentar os fatos quânticos. Quando estava em visita ao SLAC — Centro Acelerador Linear de Stanford — Bell descobriu essa prova que, desde então, tornou-se conhecida como teorema de Bell. Os inusitados requisitos que o teorema de Bell impõe à realidade dá-nos a mais clara imagem que temos hoje da irredutível estranheza do mundo quântico.

Argumentando com base na teoria quântica e um pouco de aritmética, Bell conseguiu mostrar que qualquer modelo da realidade — seja ele comum ou contextual — deve ser *não local.* O teorema de Bell tem sido, desde então, demonstrado em termos somente de fatos quânticos, sem necessidade de qualquer referência à teoria quântica. Em sua versão mais atualizada o teorema de Bell diz que os fatos quânticos e um pouco de aritmética exigem que a realidade seja não local. Em uma realidade local, as influências não podem propagar-se mais rapidamente do que a luz. O teorema de Bell diz que em qualquer realidade desse tipo, a informação não se alastra com rapidez suficiente para explicar os fatos quânticos: a realidade precisa ser não local.

Suponhamos que a realidade consistia de objetos comuns que possuam, de forma inata, os seus atributos. O teorema de Bell exige de um mundo como esse que seus objetos estejam

ligados por influências não locais. O modelo de Bohm representa um mundo desse tipo. Nesse modelo, um campo invisível informa ao elétron as alterações ambientais com um tempo de resposta que pressupõe velocidades superiores à da luz. O teorema de Bell mostra que essa característica da onda-piloto (de ser mais rápida que a luz) não é absolutamente acidental. Sem ligações mais rápidas que a luz, um modelo da realidade, formado de objetos comuns, simplesmente não poderia explicar os fatos.

Suponhamos que a realidade consista de entidades contextuais — que não possuem atributos próprios, mas adquirem-nos no ato da medição — isto é, um estilo de realidade favorecido por Bohr e Heisenberg. O teorema de Bell exige, de tais entidades, que o contexto que lhes determina os atributos deva incluir regiões fora do raio de ação (à velocidade da luz) do local da medição. Em outras palavras, somente as realidades contextuais, que sejam não

locais, podem explicar os fatos.

O teorema de Bell prova que qualquer modelo de realidade, comum ou contextual, deve estar sujeito a influências que não respeitam o limite ótico de velocidade. Se o teorema de Bell é válido, vivemos em uma realidade que pressupõe velocidades superiores à da luz. A descoberta feita por Bell, de que a realidade profunda é necessariamente não local, é o mais importante sucesso da pesquisa da realidade desde a criação da teoria quântica.

Embora tenha sido motivado pela teoria quântica, o teorema de Bell tem raízes mais profundas. A prova de von Neumann, por exemplo, depende da veracidade da teoria quântica, o que não acontece com o teorema de Bell. Conforme veremos, para demonstrar o teorema de Bell, tudo o que precisamos é dos fatos e de um pouco de aritmética. Os fatos relevantes não estão em questão; John Clauser mediu-os em Berkeley, em 1972. Embora a teoria quânti-

ca atual não mostre qualquer sinal de debilidade, ela pode desmoronar a qualquer tempo. O teorema de Bell sobreviverá à sua morte e imporá o caráter não local à sua sucessora. Considerando que o teorema de Bell faz contato com um aspecto geral da realidade em si, ele prevê a forma de todas as futuras teorias físicas.

A VERSÃO DE FEYNMAN DA TEORIA QUÂNTICA

Nos últimos anos da década de 40, enquanto Bohm escrevia o seu popular livro didático sobre a interpretação de Copenhague, Richard Feynman [Falecido em 1988, aos 65 anos de idade. Prêmio Nobel em 1965 com o livro Surely you're joking Mr. Feynman (N. do T], então professor da Universidade Cornell, descobriu a quarta versão da teoria quântica, denominada abordagem "da adição de histórias". Embora faça as mesmas previsões que as outras três teorias quânticas fa-

zem, a variação de Feynman é mais do que meramente uma nova linguagem, e não pode ser alcançada por uma transformação de Dirac. Ela é, fundamentalmente, uma nova maneira de se olhar a teoria quântica.

Teoria Quântica # 4: Heisenberg representou-a como uma matriz; Schrödinger, como uma onda; Feynman representa a substância quântica como uma *soma de possibilidades*. Tudo aquilo que poderia ter acontecido influencia o que na verdade acontece. As possibilidades quânticas de Feynman são diferentes das probabilidades clássicas. Classicamente, quanto mais numerosas forem as modalidades de ocorrência de um evento, mais provável será a sua ocorrência. Na teoria quântica, as possibilidades possuem uma natureza ondulatória que lhes permite anularem-se umas às outras. Assim, o aumento do número de possibilidades quânticas nem sempre torna mais prová-

vel um evento.

A fim de calcular o destino de um elétron, Feynman adiciona todas as suas possíveis histórias. De maneira peculiar ao quantum, muitas histórias se cancelarão. O que resta representa o que na verdade acontecerá - expresso sob a forma de uma amostragem de probabilidades.

A abordagem das histórias somadas, de Feynman, é especialmente útil na realização de cálculos quânticos complexos. Para prever o que acontecerá em uma determinada situação, o físico teórico enfileira, por classes, as possíveis histórias, em termos de sua relativa importância, e soma primeiramente as grandes classes, para saber quais as histórias que já foram somadas, Feynman inventou os seus famosos diagramas. Cada diagrama é um registro taquigráfico de uma classe inteira de histórias possíveis. Tão convincentes são os hieróglifos de Feynman que os físicos, ao invés de dizerem "somar histórias", usualmente dizem "somar

diagramas".

Minha exposição da teoria quântica, no Capítulo 6, foi inspirada, principalmente, pela pitoresca abordagem da adição de histórias, de Feynman. A maneira de Feynman fazer as coisas é original e ousada. Numa conferência recente, Freeman Dyson, colega de Feynman, relembrou suas primeiras impressões dessa inusitada abordagem da teoria quântica: "Há trinta e um anos, Dick Feynman falou-me de sua versão da mecânica quântica, calcada na 'adição de histórias'. Ele disse que 'o elétron faz qualquer coisa que o agrade. Segue qualquer direção, a uma velocidade qualquer, para a frente ou para trás no tempo, a seu bel-prazer; e então você adiciona as amplitudes e obtém a função da onda'. Virei-me para ele e disse 'você é louco'. Mas ele não é."

Este relato dos pontos altos da pesquisa da realidade quântica é necessariamente breve e incompleto. Para o leitor em busca de mais de-

talhes, recomendo o excelente livro de Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*.

Os físicos não abandonaram voluntariamente a realidade comum para chapinhar em dezenas de bizarras e contraditórias imagens do mundo. As experiências os levaram a entrar no pântano quântico. Examinaremos, a seguir, essas persuasivas experiências, tribunal de última instância dos físicos: os incômodos fatos quânticos.

4. Encarando os Fatos Quânticos

> Lembro-me das discussões com Bohr, que se prolongavam por muitas horas até noite alta e terminavam em um quase desespero, e como, ao fim da discussão, eu saía sozinho para andar no parque da vizinhança, e repetia para mim mesmo, sempre e sempre, a mesma pergunta: "Como pode a natureza ser tão absurda quanto se nos mostra nessas experiências atômicas?"
> Weiner Heisenberg

Os físicos, apesar de todas as suas noções singulares, constituem, basicamente, um grupo conservador. A maioria deles se contentaria em habitar o sólido mundo clássico criado pelos grandes cientistas da Era Vitoriana, e deixar para a

ficção científica de Júlio Verne o encargo das desenfreadas especulações sobre a natureza das coisas. No entanto, os novos fatos quânticos forçaram-nos a admitir que o mundo certamente repousa sobre alguma estranha realidade profunda. Considerando que os cientistas rotineiramente entram em contato com fatos que revelam tais realidades exóticas, a vida em um moderno laboratório de física deveria ser bastante incomum.

Imaginemos que Max, o famoso físico quântico, numa manhã de segunda-feira, decida encarar os fatos quânticos. Vestido numa armadura resistente ao quantum, ele entra em sua câmara em forma de bolha, acena um adeus para o mundo do dia-a-dia e se prepara para penetrar nos misteriosos domínios do quantum. Sozinho no escuro, Max testa o sistema mantenedor das condições ambientais e o crucial circuito de retorno que o trará de volta à realidade comum. Em seguida, respira fundo e aperta o bo-

tão.

Numa fração de segundo, Max atravessa a camada dos fenômenos deste mundo e penetra na realidade quântica profunda. Louvado seja Heisenberg! Séculos de certezas newtonianas desaparecem num instante. Quando Max entra no Lugar Sem Separação, os objetos sólidos se fundem na inteireza indivisa. Max se integra no mistério no momento em que sua membrana sujeito/objeto se dissolve. Em sintonia com a totalidade, mais rápido do que a luz, Max cria um novo universo onde quer que pouse o seu olhar onipotente.

Com o que se parecem as coisas lá embaixo? Maxine, irmã de Max, diz que é tal e qual a equação de Schrödinger, só que um pouco mais. É preciso ver para crer. Atrás das cercas de alta segurança do laboratório quântico de Max, a consciência cria a realidade, fala-se exclusivamente a lógica quântica e, para a viagem de volta, pode-se dispor de um bilhão de

universos distintos.

EFEITO CINDERELA: O CARÁTER COMUM DOS FATOS QUÂNTICOS

É triste dizer que os laboratórios de física não são assim excitantes. A despeito das exóticas realidades criadas para explicá-los, os fatos quânticos são acontecimentos comuns; as experiências quânticas são surpreendentemente rotineiras, principalmente quando comparadas às afirmações extravagantes dos realistas quânticos. Mesmo a nossa mais clara janela efetivamente aberta para a realidade profunda — a famosa experiência EPR, que corrobora o teorema da interconectibilidade, de Bell — é, conforme veremos, absolutamente comum.

Todas as experiências quânticas consistem de acontecimentos comuns, e a esse fato damos o nome de efeito Cinderela. O mundo pode, na verdade, ser tão estranho quanto afirmam al-

guns físicos, embora não faça alarde disso, preferindo — como Cinderela — esconder a sua mágica sob um disfarce humilde. O efeito Cinderela é, por si só, um exemplo sutil da sobrenatural idade quântica: por que a natureza utiliza realidades extraordinárias para manter uma aparência externa meramente ordinária?

Niels Bohr, em sua versão da teoria quântica, conhecida como interpretação de Copenhague, deu ao efeito Cinderela um lugar proeminente, determinando que todas as experiências quânticas fossem descritas em linguagem comum — Bohr chamava-a linguagem "clássica":

"Embora os fenômenos transcendam amplamente o escopo da explicação física clássica, o registro de todas as evidências deverá ser expresso em termos clássicos... O registro dos arranjos experimentais e dos resultados da observação deverão ser expressos em linguagem simples, sem ambiguidades, mediante o emprego apropriado da terminologia da física clássi-

ca."

Em outras palavras, embora a explicação dos fatos quânticos esteja longe de ser comum, os fatos em si são constituídos pelos mesmos tipos de eventos que formam os fatos pré-quânticos — em conjunto, agem tão discretamente quanto os da vida diária. Bohr foi um dos poucos teóricos quânticos que enfatizaram o caráter comum do fato quântico. Bohr acreditava que esse caráter é inerente ao modo humano de percepção, e por isso, todos os futuros fatos quânticos deveriam ser, também, fatos comuns. Os seres humanos estão destinados a experimentar indiretamente o mundo quântico; nunca gozaremos, como Max, a experiência direta da realidade quântica.

Sessenta anos de experiências confirmam a opinião de Bohr. O estado atual da arte de lidar com o quantum nos impede de experimentar diretamente a realidade quântica. Todas as experiências humanas — ou, pelo menos, todas

as experiências da física — são comuns na aparência, e não quânticas. Ainda nos resta verificar se a confiança nos modos clássicos de percepção é, ou não é, uma característica permanente da condição humana. Nós, os seres humanos, somos animais engenhosos, talvez engenhosos demais para nosso próprio bem. Considerando que "a realidade traz consequências", podemos prever que, se uma dessas realidades quânticas for "realmente real", descobriremos, eventualmente, a maneira de experimentá-la diretamente: o estranho laboratório de Max pode não estar relegado a um futuro tão remoto. Vemos hoje a realidade quântica através de uma lente escura, mas, no futuro, vê- la-emos cara a cara. Por outro lado, considerando que todos, os fatos quânticos de hoje são admitidamente comuns, que base têm os físicos para fazerem suas chocantes afirmações a respeito da realidade profunda?

Os fatos quânticos são positivamente co-

muns. Mas a teoria quântica - a única explicação que possuímos para esses fatos - é decididamente não comum. Considerando que a teoria quântica se adapta, com exatidão, aos fatos, muitos físicos estão seguros de que ela mantém algum tipo de relacionamento com a própria realidade: um tal encontro perfeito entre teoria e fatos não seria acidental. Os físicos produzem diferentes imagens da realidade quântica, dependendo de quais aspectos da teoria quântica eles decidem levar a sério, e quais os que descartam como meros artifícios matemáticos de linguagem.

A realidade quântica não aparece diretamente nos fatos quânticos; ela surge, indiretamente, da teoria quântica, que espelha perfeitamente aqueles fatos. Antes de examinar essa teoria que sustenta tantas realidades estranhas, passemos os olhos em alguns dos fatos que ela explica com tanto sucesso.

A mais simples experiência quântica con-

cebível necessita de uma fonte e de um detector de substância quântica, e de algo que, colocado entre eles, altere, de uma maneira sistemática, a substância quântica.

TESTANDO UMA ENTIDADE QUÂNTICA

Como entidade quântica típica, escolhemos o elétron, a primeira "partícula elementar" a ser descoberta — pelo cientista inglês Joseph J. Thomson, em 1897. A despeito das modernas tentativas de dividi-lo em partes mais puras, mediante a utilização de uma energia cem bilhões de vezes superior à que é necessária para dividir o átomo, o elétron permanece firmemente elementar. O elétron, ao que parece, simplesmente não possui partes componentes.

No interior dos aparelhos de TV, um número astronômico de elétrons detecta, decodifica e mostra a informação que chega às nossas casas transportada por ondas eletromagnéticas

que vibram dez milhões de vezes mais lentamente do que as ondas de luz visível. O coração de um aparelho de TV é o seu tubo de imagem.

No interior do tubo de imagem, um feixe de elétrons pinta, sessenta vezes por segundo, uma nova imagem de TV sobre a tela de fósforo. Para fonte e detector de substância quântica, tomaremos emprestados, respectiva mente, o canhão de elétrons e a tela de fósforo do tubo de imagem.

O canhão de elétrons contém um filamento metálico aquecido para expulsar os elétrons, e alguns cilindros metálicos eletricamente carregados para acelerá-los a altas velocidades. O canhão de elétrons de um aparelho de TV — com cerca de quinze centímetros de comprimento — é uma miniatura dos aceleradores lineares. No interior do aparelho de TV a cores, os elétrons se chocam de encontro à tela com uma energia de cerca de 25 mil volts. Os elétrons do acelerador linear de Stanford, cujo

comprimento é superior a três quilômetros, alcançam energias um milhão de vezes maiores.

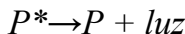
Os botões localizados atrás do aparelho de TV controlam a atividade do canhão de elétron. Quando pegarmos emprestado o canhão de elétrons para nossa experiência quântica, traremos também dois desses botões: o controle de brilho, que faz variar a intensidade — elétrons por segundo — do feixe, e o controle de alta voltagem, que faz variar a quantidade de movimento do elétron — a velocidade com que ele está se deslocando quando atinge a tela de fósforo.

O ingrediente ativo da tela de fósforo é uma substância sólida — o fósforo — moída até tomar a consistência do pó-de-arroz, misturada com cola e espalhada numa fina camada sobre a superfície posterior da placa frontal de vidro. Como seu nome indica, o fósforo é uma molécula que desprende luz. Uma molécula de fósforo, normalmente, permanece no seu "estado de terra" — estado de energia mínima, sim-

bolizado por *P***.** Quando a molécula do fósforo ganha energia — ao ser atingida, por exemplo, por um elétron em alta velocidade — ela se transfere para o "estado de excitação", simbolizado por *P** (pronuncia-se *"P asterisco").*

$$P + Energia \rightarrow P^*$$

A molécula de fósforo não permanece muito tempo nesse estado de excitação. Ela quer livrar-se desse excesso de energia e voltar ao seu estado de terra. Para a molécula de fósforo, a maneira mais fácil de perder energia é emitir um fóton de luz:

$$P^* \rightarrow P + luz$$

A molécula de fósforo está agora de volta ao seu estado de terra, pronta para ser novamente excitada, e uma parte da energia do elétron foi convertida em luz. A ação global do

fósforo pode ser expressa do seguinte modo:

$$P + energia \rightarrow P + luz$$

Assim como um catalisador químico facilita as reações químicas sem ser alterado ou usado, também o fósforo funciona como uma espécie dé catalisador energético, permanecendo inalterado enquanto transforma em luz uma parte da energia cinética do elétron.

O fósforo é especialmente útil como detector de quanta, por ser suficientemente sensível para reagir a um quantum isolado (um elétron, no caso em pauta) e não ser muito exigente quanto à origem da energia de excitação. A molécula do fósforo brilha quando atingida por um elétron, mas o próton, o píon ou qualquer outra partícula eletricamente carregada também serviriam. A molécula do fósforo pode ser excitada até mesmo pela luz — isto é, por um fóton. Transformar a luz em luz pode não parecer

muito prático, mas faz sentido quando a luz incidente é invisível — radiações infravermelhas ou raios-X, por exemplo. Moléculas de fósforo que transformam radiações invisíveis em luz visível produzem boas telas para exposição de raios-X.

Uma molécula de fósforo pode ser excitada por apenas um volt de energia. Uma partícula quântica, com vários milhares de volts, pode excitar muitas moléculas de fósforo, produzindo um clarão facilmente visível a olho nu. As moléculas de fósforo constituem detectores quânticos sensíveis e plenamente reutilizáveis que indicam a presença de uma partícula quântica através de um sinal luminoso. Para podermos discutir metodicamente o processo de medição do quantum, todos os nossos detectores utilizarão as moléculas de fósforo como sensores primários.

A NATUREZA DO ELÉTRON COMO

PARTÍCULA

Para efetuar a nossa primeira experiência quântica, apontamos o canhão de elétrons para a tela de fósforo e observamos uma pequena mancha luminosa no ponto em que o feixe atinge a tela. A intensidade luminosa dessa mancha cresce quando aumentamos o número de elétrons, girando o controle de brilho, ou quando aumentamos a energia do elétron, girando o botão de alta voltagem. O tamanho da mancha permanece o mesmo enquanto manipulamos esses controles.

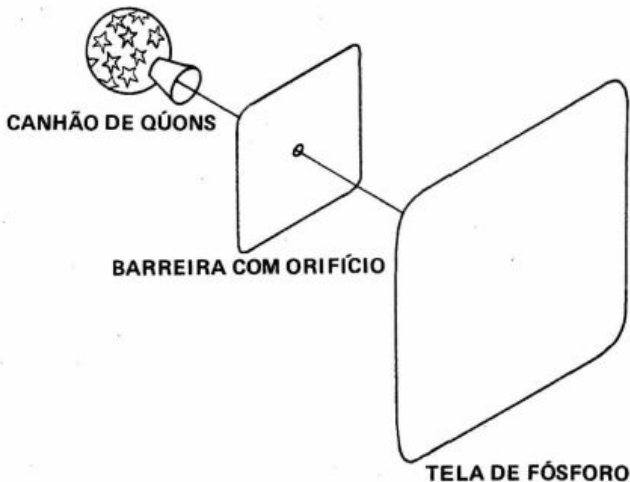



Fig. 4.1. Experiência da difração do elétron. Uma fonte regulável (canhão de quons) dispara elétrons contra a tela de fósforo através de um diminuto orifício circular. Um onda se dispersará ao passar pelo orifício; uma partícula não pode dispersar-se, mas deverá seguir uma trajetória determinada. Qual será a opção do elétron, a da onda ou a da partícula?

Girando o controle do brilho no sentido oposto, reduziremos a luminosidade da mancha. No feixe de baixa intensidade, podemos

ver o efeito dos elétrons individuais que o formam: a mancha já não possui um brilho contínuo, mas cintila a cada vez que um novo elétron excita um bloco de moléculas de fósforo. Baixando muito o brilho, podemos observar a chegada dos elétrons isolados que atingem a tela do aparelho de TV. Essa experiência nos dá uma prova tangível da natureza do elétron como partícula: os elétrons são partículas porque podemos contá-los.

Quão pequenas são essas partículas de eletricidadeΔ Os físicos têm tentada determinar o tamanho do elétron utilizando outro elétron como sonda. Dois feixes de elétrons são acelerados e, em seguida, desviados por intermédio de eletroímãs, de modo a se encontrarem de frente. Para agirem uns sobre os outros, os elétrons não precisam se tocar, porque cada um deles está envolto em seu próprio campo elétrico. Quando a separação entre eles é grande, os elétrons se espalham em razão desses cam-

pos. Os físicos esperam medir o seu tamanho intrínseco forçando-os a se aproximarem cada vez mais (aumentando a energia do acelerador) até que ocorram diferenças em relação ao espalhamento devido puramente aos campos, indicativas de que os elétrons, propriamente ditos, estão começando a se tocar.

Os aceleradores atuais podem sondar distâncias tão pequenas quanto 10^{-16} cm — mil vezes menores do que o diâmetro de um próton. Mesmo em separações dessa ordem, os elétrons ainda mostram o espalhamento devido puramente aos seus campos. Se o elétron possui, afinal, algum tamanho, este é inferior ao que nos é possível medir. Alguns físicos sugerem que o elétron é uma *partícula pontual,* cujo tamanho intrínseco é zero! Todas as partículas verdadeiramente elementares, imaginam eles, são semelhantes ao ponto matemático. Somente as entidades compostas, tais como os átomos, constituídas de partículas elementares,

mostrarão uma estrutura ou terão um tamanho definido. Nenhum dos atuais candidatos à condição de partícula elementar — quarks, léptons ou glúons - mostra qualquer estrutura detectável, corroborando, por enquanto, a conjetura relativa à partícula pontual.

O elétron é um exemplo de substância quântica que possui tanto propriedades ondulatórias quanto propriedades peculiares às partículas. O diâmetro do elétron como partícula é muito pequeno: pode ser igual a zero. Podemos realmente "ver" esses "elétrons-partículas" chegarem, um a um, à tela da TV; a evidência a favor da natureza do elétron como partícula é clara e inquestionável. Veremos, em seguida, a evidência a favor da natureza ondulatória do elétron.

A Natureza Ondulatória do Elétron

Como "sonda ondulatória", inserimos um pe-

queno diafragma ótico circular entre o canhão de elétrons e a tela luminescente, posicionando-o de modo que o feixe de elétrons passe pelo orifício.

Tomamos o orifício menor, e, com isso, esprememos o feixe de elétrons. A princípio, o feixe se estreita à medida que o orifício diminui, como comprova a diminuição da mancha na tela. Contudo, além de um certo ponto, a mancha se recusa a encolher e, de fato, começa a se tornar maior. À medida que diminuímos progressivamente o tamanho do orifício, a imagem na tela de fósforo se expande até não mais constituir uma mancha, mas uma série de anéis claros e escuros, lembrando um painel de tiro ao alvo.

Se contraímos ainda mais o orifício, a figura do alvo se amplia, o centro se expande sobre toda a tela, e, finalmente — quando a abertura do diafragma se torna muito pequena — a tela adquire um fulgor uniforme em toda a sua su-

perfície. Se continuamos contraindo o orifício, a téla de fósforo permanece uniformemente iluminada, mas a intensidade da luz diminui. Finalmente, quando o orifício se fecha completamente, a tela escurece.

Abrimos novamente o diafragma, ajustando-o de modo que os elétrons refaçam o desenho do alvo. Os físicos estão familiarizados com essa figura especial, formada de anéis concêntricos; ela foi explicada pela primeira vez em 1835, por George Biddell Airy, o astrônomo real da Grã-Bretanha. Airy calculou matematicamente o padrão que uma onda produziria quando fosse forçada a passar por um orifício circular. Seus cálculos se aplicam a qualquer tipo de onda — onda sonora, onda de água, onda de luz, ou onda de substância quântica. O padrão de Airy constitui para as ondas uma reveladora impressão digital. Quando fazemos passar alguma coisa por um furo circular e obtemos um padrão de Airy, podemos afirmar

que estamos lidando com uma onda.

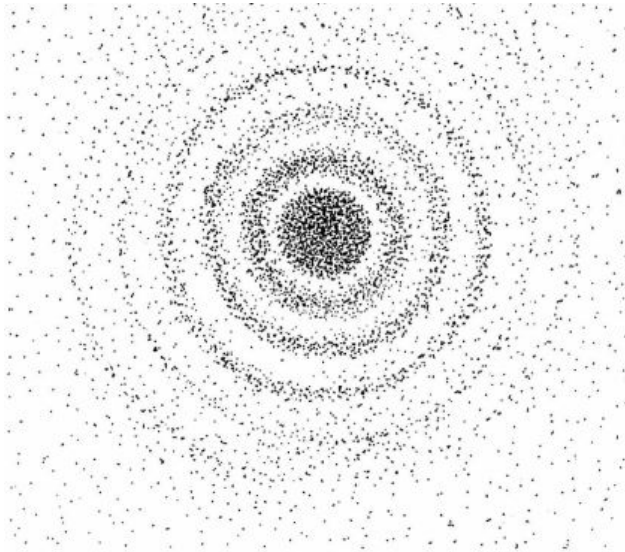



Fig. 4.2. Resultado da experiência da difração do elétron: cada e
tron produz um diminuto clarão luminoso; em conjunto, esses c
rões formam um desenho expandido — o chamado padrão de Ai
Nessa experiência os elétrons revelam seus dois aspectos, o inerer
às ondas e o inerente às partículas.

A forma global do padrão de Airy é causada pela difração da onda: a capacidade que as

ondas têm de contornarem os cantos. Os anéis claros e escuros são causados por uma interferência ondulatória: a variação de intensidade que ocorre quando pequenas ondas, percorrendo caminhos diversos, se encontram, ora em fase, ora fora de fase. Airy mostrou que o padrão global pode ser explicado pela ação recíproca dos efeitos de difração e interferência.

Os cálculos de Airy explicam todos os detalhes do desenho do alvo — o diâmetro de cada anel escuro e a intensidade luminosa de cada anel claro. Em particular, o diâmetro angular 0 (em graus) do círculo central (disco de Airy) é dado, em termos do comprimento de onda L e do diâmetro do orifício d, por uma simples fórmula:

$$\theta = 70\ (L/d)$$

Note-se que esta fórmula mostra uma relação inversa entre o tamanho do orifício d e *o*

tamanho angular do disco central θ, em concordância com a observação experimental de que a figura se amplia quando o orifício se contrai. Vemos ainda que, quando a orifício tem a mesma dimensão do comprimento de onda, o disco de Airy subentende um ângulo de 70 graus, o que nos permite calcular o comprimento de onda do elétron a partir do tamanho do padrão de Airy.

Quando efetuou os seus cálculos, Airy não tinha os elétrons em mente — estes ainda estavam para ser descobertos. Ele tentava explicar o padrão que a luz produz quando passa através de um pequeno orifício. Podemos ver o padrão ótico de Airy, fazendo um furo diminuto (0,1 mm) numa folha de alumínio, segurando-a à altura do nosso olho e mirando uma fonte de luz pontual (o sol é demasiado grande), tal como uma lâmpada de rua distante.

No século XIX, a explicação de Airy para esse padrão, como autenticação da ação ondu-

latória, forneceu a peça-chave para que se provasse a natureza ondulatória da luz. Cem anos mais tarde, os físicos veem o padrão de Airy do elétron como uma prova (do século XX) da natureza ondulatória da matéria.

O elétron parece ter atributos contraditórios. Como *partícula*, ele precisa estar localizado no espaço, não pode ser dividido em partes, e conserva sua identidade quando colide com outras partículas. Como *onda*, ele se estende sobre vastas regiões do espaço, é divisível numa infinidade de maneiras, e se funde inteiramente com as outras ondas que, por acaso, encontra.

Uma teoria puramente baseada na partícula não explica o padrão de Airy; uma teoria puramente ondulatória não explica os clarões na tela. O elétron, na realidade, não é partícula nem onda, mas uma entidade inteiramente nova para a experiência humana, que exibe propriedades de uma e outra. O elétron é pura substância quântica.

Efetuamos essa experiência com elétrons, mas qualquer outra entidade quântica se comportaria do mesmo modo. Fótons, quarks e outras partículas elementares igualmente mostrarão um padrão de Airy constituído de pequenos clarões se os fizermos passar através de um orifício diminuto. Para verificarmos a sua natureza quântica, devemos meramente substituir o canhão de elétrons por outro que dispare fótons ou quarks.

A maioria dos físicos acredita que objetos comuns — bolas de tênis, tomates, caminhões Mack — em princípio, também exibiriam propriedades ondulatórias quânticas, quando submetidos a condições apropriadas, mas seus comprimentos de onda de de Broglie, extremamente curtos, tornam impossível a observação prática desses efeitos.

Tudo no mundo é substância quântica pura, uma união física de partícula e onda. O "aspecto partícula" da onda luminosa é denomina-

do "fóton"; o "aspecto partícula" da gravidade é denominado "gráviton"; o "aspecto partícula" da força nuclear forte é denominado "glúon". Não existe um termo para denominar o objeto quântico genérico; propomos a palavra "quon". O quon é uma entidade qualquer, não importa quão imensa ela seja, que, do mesmo modo que o quantum, apresenta aspectos inerentes tanto à onda quanto à partícula.

O que seria de uma experiência, se não existissem botões para se girar? Vejamos o que acontece ao padrão de Airy quando giramos o controle de brilho e o controle de alta voltagem do canhão de elétrons.

Comecemos pelo controle de alta voltagem. Quando aumentamos a voltagem, o padrão de Airy se torna menor, chegando, eventualmente, a se transformar numa pequenina mancha. A redução da voltagem fará o padrão expandir-se. Evidentemente, o controle da alta voltagem afeta o comprimento de onda do elétron; quan-

to mais alta for a voltagem, menor será o comprimento de onda. Num tubo de TV, a alta voltagem corresponde a uma maior quantidade de movimento do elétron. Podemos utilizar a razão de variação, já observada, do tamanho do padrão de Airy com a voltagem, para descobrir a relação entre a quantidade de movimento do elétron e seu comprimento de onda. Para cada ajuste da voltagem, calculamos o comprimento de onda L do elétron, a partir da fórmula de Airy, e o tamanho observado do disco de Airy. A quantidade de movimento p do elétron está relacionada à sua voltagem através de uma bem conhecida fórmula clássica. A relação experimental, obtida através desse ensaio de difração baseado na TV, entre a quantidade de movimento de um elétron e seu comprimento de onda, é particularmente simples:

$$p = h/L$$

onde h é uma constante que aparece em quase todas as relações quânticas - a onipresente constante de ação de Max Planck.

Expressa em termos de frequência espacial k**,** ao invés de comprimento de onda L**,** essa relação toma a forma:

$$p = hk$$

Expressar o aspecto ondulatório do elétron em termos de comprimento de onda ou em termos de frequência espacial é apenas uma questão de conveniência. O importante é que essas experiências sobre a difração do elétron mostram uma conexão extremamente simples (envolvendo a constante de Planck) entre a quantidade de movimento — uma propriedade inerente às partículas — e o comprimento de onda ou frequência espacial — uma propriedade antes associada somente às ondas.

Essa noção de que o elétron, até então con-

siderado uma simples partícula, também possuía aspectos ondulatórios foi primeiramente proposta pelo físico francês Louis de Broglie em 1924. De Broglie previu a relação acima, entre a quantidade de movimento e o comprimento de onda, posteriormente verificada pelos americanos Davisson e Germer em experiências sobre a difração do elétron, semelhantes, em princípio, ao nosso aparelho de TV dotado de um orifício.

AS ONDAS ELETRÔNICAS SERÃO "ONDAS DE AGRUPAMENTO"Δ

O fato de que o elétron exibe propriedades tanto ondulatórias quanto inerentes às partículas não é, em si, estranho. O que causa estranheza é a maneira pela qual essas propriedades coexistem. Não nos espanta saber que as ondas de água consistem de partículas - moléculas de água - que, coletivamente, se comportam pomo

uma onda. O som é outro exemplo de uma onda se deslocando num agrupamento de partículas. Damos a essas ondas constituídas de partículas o nome de "ondas de agrupamento”. Para que se produza uma onda de agrupamento, é necessário que um grande número de moléculas estejam fortemente agrupadas. Uma sineta no interior de um vaso fechado não produzirá qualquer som se não houver ar suficiente para sustentar as ondas sonoras.

O teste crucial para as ondas de agrupamento é a diluição. Podemos fazer desaparecer uma onda de agrupamento diminuindo o número de moléculas agrupadas. Bombeando o ar para fora do vaso, faremos silenciar a sineta.

Podemos diluir o nosso feixe de elétrons reduzindo o controle de brilho. Primeiramente, ajustemos todos os controles de modo a obtermos um grande e nítido padrão de Airy. Em seguida reduzamos o brilho. Será que o padrão de Airy irá desaparecer quando o número de elé-

trons se tornar pequeno, provando, assim, que a onda eletrônica é uma mera "onda de agrupamento"? Não confiemos nisto.

Quando reduzimos o brilho, o número de elétrons que atinge a tela também diminui. O brilho começa a cintilar, dividindo-se progressivamente em clarões individuais. Finalmente, apenas um elétron atinge a tela a cada minuto, aproximadamente. A este baixo nível de brilho, o tubo de TV estará vazio na maior parte do tempo. Essa drástica falta de elétrons terá, certamente, eliminado qualquer possibilidade de ocorrência das ondas de agrupamento. Mas eliminou também o padrão de Airy. Tudo o que vemos na tela é um clarão isolado a cada minuto.

A fim de registrar algum possível padrão, formado a longo prazo por esses clarões isolados, colocamos sobre o vidro uma folha de filme fotográfico. Após decorridas algumas semanas, voltamos e revelamos o filme. O pri-

meiro físico que efetuou esse tipo de experiência sobre a diluição do quon, o inglês G. I. Taylor, foi navegar no Tâmisa enquanto os clarões se acumulavam. Voltando ao laboratório, revelamos o filme e vemos milhares de manchas, sendo cada uma a marca deixada por um elétron isolado. Porém, ao invés de estarem espalhadas ao acaso, essas marcas formam, exatamente, o mesmo padrão de Airy que teria sido formado por um feixe de alta intensidade. Evidentemente, os elétrons se comportam como ondas, não importa o quanto estejam diluídos. Definitivamente, os elétrons não constituem ondas de agrupamento, como o som ou as ondas que arrebentam na praia.

A experiência da diluição do quon mostra que, embora apareça na tela como uma partícula, cada elétron, isoladamente, se desloca do canhão para a tela como se fosse uma onda. O elétron acomoda seus aspectos contraditórios assumindo um a cada vez. Quando observado,

o elétron se parece com uma partícula — pequenina e poderosa, diga-se de passagem. No intervalo entre as observações, o mesmo elétron se propaga como uma onda sobre grandes regiões do espaço. Essa variação alternada de identidades é típica de todas as entidades quânticas e constitui a causa principal da crise de realidade na física.

A COEXISTÊNCIA ONDA/PARTÍCULA

O mundo é formado inteiramente de quons que se comportam como esse elétron. Como explicaremos uma entidade como essa? Ela age como partícula sempre que olhamos para ela. Nos intervalos age como uma onda. Por ser o elétron medido radicalmente diferente do elétron não medido, tudo indica que não podemos descrever esse quon (ou outro qualquer) sem referi-lo ao ato da observação.

Se ignorássemos, por um momento, as ob-

servações, seríamos tentados a dizer que o elétron é todo onda, pois é assim que ele se comporta quando não está sendo olhado. Contudo, essa descrição estaria desprezando o importante fato de que todas as observações nos mostram nada mais do que pequenas partículas - somente os seus padrões são ondulatórios. Se disséssemos, por outro lado, que entre as medições o elétron é realmente uma partícula, não poderiamos explicar os fatos quânticos. O que faz cada elétron saber como encontrar o seu lugar no padrão (ondulatório) de Airy? O que faz um elétron isolado "interferir com", para produzir os anéis escuros do padrão de Airy?

A dificuldade essencial da descrição da realidade quântica é que os quons não medidos parecem comportar-se de modo totalmente diferente dos quons medidos, e que nenhum dos dois comportamentos é por si só suficiente para explicar a maneira como o próprio mundo se comporta. Os realistas quânticos gostariam de

ser capazes de fazer uma só descrição do mundo como ele é, independentemente de como ele se mostra quando o olhamos. Naturalmente, uma tal descrição deveria explicar a aparência do mundo quando medido, mas o ato da medição deveria ser uma parte secundária de qualquer modelo de realidade, e não uma característica essencial.

Contudo, os fatos quânticos nos dão, não uma, mas duas descrições do mundo — cada uma, isoladamente, inadequada, e as duas, em conjunto, contraditórias. Além disso, o laço que une essas duas descrições é o ato da observação, sem o qual nenhuma das duas faz sentido.

Os físicos normalmente apelam para a experiência a fim de resolverem questões de princípios. Utilizando um tubo de TV,, examinamos algumas das estranhas propriedades quânticas do elétron. Certamente existirão outras experiências que poderíamos efetuar e que nos

ensinariam mais do que conseguimos aprender com a ajuda dessa montagem isolada. Talvez através de outros tipos de medição pudéssemos saber o que o elétron realmente faz no cinescópio da TV quando "não observado".

O PRINCIPIO DA INCERTEZA PROTEGE A COEXISTÊNCIA ONDA/PARTÍCULA

De fato, sempre que efetuamos outras experiências, obtemos novas informações, mas estas nunca são suficientes para resolvermos o problema; todas as experiências mostram sempre a mesma dualidade "onda não medida/partícula medida". Parece existir uma barreira instrumental impedindo que a sondagem do mundo quântico seja bastante profunda para que se possa decidir a questão onda/ partícula a favor de um ou outro desses dois modos de ser. A investigação minuciosa do comportamento do quon sempre esbarra na peculiaridade quântica

caracterizada pela conjugação dos atributos.

Na física clássica, todos os atributos de uma entidade são, em princípio, passíveis de medição, e a. precisão da medida fica limitada somente pela engenhosidade do experimentador. O contexto da medição de um quon é outro complemento diferente. Pode- se medir, tão acuradamente quanto se queira, um atributo isolado de um quantum, mas essa medida inevitavelmente tornará impreciso algum outro atributo do quantum. Ao contrário dos atributos independentes, da física clássica, os atributos quânticos parecem estar ligados a outros atributos, pelo menos durante o ato da medição.

O estudo sistemático dos atributos que estão interligados durante a medição mostra que os atributos quânticos sempre surgem aos pares. Cada atributo A possui um relacionamento especial com um outro atributo V denominado seu "atributo conjugado". O fato de A e V estarem conjugados limita a precisão com que

se pode conhecê-los. Se medimos A com boa precisão, devemos aceitar uma precisão menor quando formos medir o atributo V. De modo geral, as precisões mútuas dos atributos A e V estão limitadas por um relacionamento do seguinte tipo:

$$\Delta A \,.\, \Delta V > K$$

onde ΔA *e* ΔV são as variâncias dos valores experimentais dos atributos conjugados A *e* V. Essa relação determina que, por mais habilidoso que seja o experimentador, o produto das precisões ΔA e ΔV de suas medições nunca será inferior a uma certa constante K. É claro que, se a experiência não for efetuada com o cuidado máximo, as variâncias poderão exceder esse limite, contudo jamais serão inferiores. Para uma perfeita medição quântica, o produto das duas variâncias conjugadas será igual a K.

Essa restrição das medições é válida para

todos os atributos dinâmicos — i.e., qualquer atributo que não seja constante. No caso extremo em que a medida de um atributo é feita com precisão absoluta ($\Delta A = 0$), fica anulado todo o conhecimento de seu atributo conjugado (**V** = ∞). Devido a essa restrição fundamental imposta à medição dos atributos conjugados, tem-se a impressão de que a *metade dos atributos de um quon está sempre oculta.* Essa restrição imposta às precisões mútuas das medições de certos atributos é suficiente para impedir que se planeje uma experiência para mostrar o que realmente acontece, e resolver de modo decisivo o dilema da onda/partícula.

Os atributos conjugados mais importantes (e os primeiros que foram descobertos) são a quantidade de movimento e a posição de um quon. O relacionamento conjunto que restringe a precisão mútua de suas medições é conhecido como o princípio da incerteza de Heisenberg:

$$\Delta p \,.\, \Delta 2x > h$$

onde ΔP é a incerteza da quantidade de movimento, Δx é a incerteza da posição, e h *é* a constante de Planck. O princípio de Heisenberg diz que, para medirmos acuradamente a posição, devemos sacrificar o conhecimento preciso da quantidade de movimento. Um relacionamento semelhante se aplica a todos os atributos dinâmicos e impede que se esclareça a questão da realidade quântica utilizando a luz da experiência. As relações de Heisenberg demonstram que qualquer experiência terá um ponto cego suficientemente grande para esconder a solução do enigma onda/partícula.

Além de mostrar a natureza onda/partícula do elétron, a experiência de Airy ilustra o princípio de Heisenberg. Essa experiência pode ser traduzida como uma tentativa de medir a posição lateral do elétron com uma precisão igual ao diâmetro do orifício aberto na placa. Imedi-

atamente após a passagem do elétron pelo orifício, sua posição fica conhecida com uma precisão de $\Delta x = D$.

A fórmula de Airy mostra que, quanto menor foro orifício, maior será a difração do feixe que passa por ele. Isto quer dizer que, para um orifício pequeno, o feixe sofre uma sensível expansão de sua quantidade de movimento lateral, devida a essa medição de posição. A expansão da quantidade de movimento provocada por um furo de tamanho conhecido pode ser calculada pela fórmula de Airy. Juntando tudo, obtemos uma relação de incerteza igual ao limite de Heisenberg:

$$\Delta p \, . \, \Delta \mathrm{x} = \mathrm{h}$$

Para a experiência de Airy, à distribuição mútua da precisão desses dois atributos conjugados é igual à constante de Planck. Essa experiência é um exemplo de uma medição quântica

perfeita. Ela representa o máximo que se pode conhecer sobre a posição e a quantidade de movimento laterais de um feixe de elétrons.

A essência do estranho mundo quântico permeia essas experiências simples. Ê um mundo que se comporta como ondas quando não observado, e como partículas quando sob observação, um mundo cujos atributos surgem em pares e, juntos, resistem a um exame mais minucioso. A teoria quântica leva em conta esses fatos, e muitos outros. No entanto, ao invés de resolver a questão da realidade quântica, ela aprofunda-a ainda mais.

A teoria quântica, porque espelha com precisão os fatos quânticos, possui as mesmas características que nos impedem de construir, a partir desses fatos, uma imagem consistente da realidade, independentemente do observador. A par disso, a teoria quântica mostra aspectos próprios enigmáticos (colapso da função ondulatória e embaralhamento de fases, por exem-

plo) cuja relação com o que realmente acontece no mundo é extremamente dúbia.

Caminhando paralelamente aos fatos quânticos, a teoria quântica representa como ondas os quons não medidos e como partículas os quons medidos. Indo mais além, ela interpreta essas ondas não medidas, não como ondas reais, mas como ondas de probabilidade. Devido ao seu método indireto de representação, essa teoria altamente eficaz na prática, parece tão mais afastada da realidade do que as experiências cujos resultados ela prevê com tanta exatidão. Contudo, excetuando algum súbito progresso em direção à maneira direta de Max para abreviar a realidade quântica, a teoria quântica é o nosso melhor indicador concernente à verdadeira natureza do mundo em que vivemos.

Para que possamos apreciar melhor as ondas de probabilidade que a teoria quântica utiliza para caracterizar o mundo em seu estado não medido, faremos, no próximo capítulo, uma re-

visão de algumas conhecidas propriedades do movimento ondulatório comum.

5. Movimento Ondulatório: O Som da Música

Os relógios da torre da estação das barcas marcavam 5 horas e 15 minutos — estavam um pouco adiantados. Mas passar-se-iam meses antes que os seus ponteiros voltassem a avançar, pois naquele instante o terremoto atacou.... Jesse Cook, que mais tarde tornar-se-ia comissário de polícia, lembra-se de ter ouvido um estrondo profundo e distante, "profundo e terrível" em suas palavras. E em seguida, olhando ao longo da rua Washington, ele *viu o* terremoto chegando. "A rua inteira ondulava. Era como se as ondas do oceano viessem na minha direção, e se transformassem em vagalhões enquanto se aproximavam."

William Bronson, relatando o terremoto de São Francisco

O segredo da teoria quântica é a utilização das ondas comuns, de maneira inusitada.

Todas as ondas, não importa quanto sejam exóticas, são produzidas com base num plano comum a todas, e obedecem às mesmas regras. Embora os físicos correlacionem as ondas quânticas e os fatos de uma maneira inovadora, as ondas quânticas seguem as mesmas regras antiquadas que governam as ondas na nossa banheira. Neste capítulo examinaremos o comportamento fundamental comum a todas as ondas. Mais tarde, estudaremos o mesmo comportamento nas ondas de substância quântica.

As ondas são caracterizadas por aquilo que está ondulando: no caso do som e da arrebentação na praia, o que está ondulando é, respectivamente, o ar e a água. Segundo James Clerk Maxwell, a luz é uma vibração dos campos elé-

trico e magnético. As ondas quânticas, conforme veremos, são oscilações da possibilidade.

Considerando que uma onda vibra tanto no espaço quanto no tempo, para segui-la devemos observar dois tipos de movimento. Uma das maneiras de se fazer isso é considerarmos duas imagens separadas — uma em que ficamos imóveis no espaço e observamos a onda se alterar com o tempo; na outra, o tempo para e verificamos como a onda se altera no espaço. Congelamos o tempo para obter uma imagem espacial da onda; congelamos o espaço para obter a sua imagem no tempo.

Uma das referências fundamentais de uma onda é a amplitude, que mede o desvio de sua variável física em relação ao estado de repouso. Outra importante medida de uma onda é a intensidade, que é proporcional ao quadrado da amplitude. Para todas as ondas, exceto as quânticas, a intensidade dá a medida da quantidade de energia transportada pela onda em cada pon-

to. As ondas quânticas não transportam energia alguma e, por essa razão, são às vezes denominadas "ondas vazias". A intensidade (amplitude elevada ao quadrado) da onda quântica é uma medida de probabilidade.

Uma onda pode tomar qualquer forma: algumas tomam formas sempre diferentes, outras são oscilatórias — um desfile de formas idênticas como o de uma moderna linha de produção. As ondas oscilatórias passam por ciclos no tempo e no espaço; sua essência é a repetição. O tempo que uma onda oscilatória leva para vencer um ciclo é denominado "período" da onda. O tempo do ciclo pode, também, ser expresso em termos de frequência: o número de ciclos completados em um certo tempo. O período P *e* a frequência f são nomes equivalentes para a rapidez de pulsação de uma onda em sua imagem no tempo.

O espaço que uma onda oscilatória percorre enquanto efetua um ciclo é denominado com-

primento de onda. O comprimento do ciclo pode, também, ser expresso em termos de frequência espacial: o número de ciclos que preenche uma certa distância. O comprimento de onda L e a frequência espacial k são nomes equivalentes para a taxa de repetição das pulsações de uma onda, na imagem espacial.

A fase é outra importante medida de uma onda oscilatória. Cada ponto de uma onda possui uma fase definida que indica até onde esse ponto avançou, no percurso do ciclo básico da onda. A expressão "fases da lua" traduz esse mesmo significado de "fase" como parte de um ciclo. A fase de uma onda rege o que acontece quando duas ondas se encontram. Sempre que ondas de mesma frequência (espacial ou no tempo) se juntam em fases idênticas, diz-se que elas estão "em fase"; ondas cujas fases diferem de meio ciclo estão "fora de fase".

O PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

O encontro de duas ondas, produzindo uma nova onda, pode parecer complexo, mas o que realmente acontece é surpreendentemente simples: a amplitude da onda nova, em cada ponto, é exatamente igual à soma das amplitudes de cada onda separadamente. *Quando as ondas se encontram, suas amplitudes se somam.* O fato de que as ondas, em qualquer lugar, formam uniões simples é denominado "princípio da superposição". Este princípio se aplica a todos os tipos de formas ondulatórias ainda que não sejam oscilatórias.

As ondas comuns seguem o princípio da superposição quando as amplitudes são pequenas, mas não quando as amplitudes se tornam maiores. A falha do princípio da superposição é denominada não-linearidade, e aparece como distorção nos sistemas de alta fidelidade, e como turbulência nas ondas de água. Uma das características das ondas quânticas é que elas pare-

cem obedecer, sem restrições, ao princípio da superposição: nas situações mais complexas, as amplitudes das ondas quânticas simplesmente se somam. Quando descemos ao nível das ondas quânticas, o comportamento ondulatório torna-se mais simples do que o das ondas em nossa banheira.

O princípio da superposição garante que, quando duas ondas se juntam, nada é acrescentado ou retirado. Em particular, quando uma onda sai de uma união com outra onda, ela leva precisamente a mesma amplitude que possuía quando entrou. Duas ondas podem se cruzar, formando uma superposição temporária, e prosseguirem seus caminhos sem sofrerem qualquer alteração devida a esse encontro — o que, de modo geral, não acontece a outras entidades.

Consideremos uma janela ensolarada. Os raios de luz provenientes de várias direções se cruzam ao atravessar o vidro. Se o cruzamento

das ondas de luz produzisse nelas alguma alteração, a informação que elas transportam ficaria distorcida. Devido ao fato de que as ondas de luz agem umas sobre as outras de maneira "razoável", a cena lá fora nunca perde a nitidez, por mais brilhante que seja a luz. O princípio da superposição, aplicado às ondas luminosas, mantém claras as nossas janelas.

Porque a teoria quântica, de certo modo, interpreta o mundo como formado de ondas, e não de coisas, as entidades quânticas se combinam segundo as regras da *adição ondulatória,* e não as da aritmética comum. O princípio da superposição, que rege a adição das ondas, é tão importante para o mundo quântico quanto a aritmética é importante para a vida do dia-a-dia.

INTERFERÊNCIA ONDULATÓRIA

O princípio da superposição aplicado às ondas

oscilatórias implica em que, quando essas ondas se somam, a amplitude da onda resultante dependa crucialmente das *relações de fase.*

Quando duas ondas se somam *em fase,* os picos se alinham com os picos e os vales se alinham com os vales, tornando a onda resultante maior do que as componentes. Se ambas tiverem a mesma amplitude (1 unidade), a onda resultante terá o dobro dessa amplitude. A maneira como as amplitudes se somam em fase pode ser assim simbolizada:

$$1 \Theta 1 = 2 \text{ (amplitudes em fase)}$$

onde Θ é um sinal que criamos para representar a adição de ondas.

Quando duas ondas se somam *fora de fase,* os picos se alinham com os vales, diminuindo a amplitude da onda resultante. Se as ondas incidentes tiverem a mesma amplitude (1 unidade), elas se cancelarão, e a onda resultante te-

rá amplitude zero. O modo pelo qual as amplitudes ondulatórias se somam fora de fase pode ser simbolizada da seguinte maneira:

$$1 \Theta 1 = 0 \text{ (amplitudes fora de fase)}$$

Quando a fase se encontra em algum ponto entre esses dois extremos, a amplitude resultante terá, igualmente, um valor intermediário. A adição de ondas de *fase arbitrária* pode ser assim simbolizada:

$$1 \Theta 1 = 0 \text{ a } 2 \text{ (amplitudes de fase arbitrária)}$$

Quando duas ondas de mesma amplitude se juntam, a amplitude da onda resultante poderá ter qualquer valor compreendido entre zero e o dobro da amplitude de cada onda. O fator crítico que determina o resultado dessa estranha aritmética ondulatória é a fase relativa das ondas.

Fase é uma questão de horário: daqui a quanto tempo a nova crista de onda chegará aqui∆ Esses exemplos simples mostram a importância da variável fase na adição ondulatória. Se duas ondas chegarem pontualmente na hora, a arrebentação terá 60 cm de altura; se uma das ondas estiver com um atraso de meio ciclo, o oceano estará misteriosamente calmo.

A capacidade que duas ondas têm de se aumentarem ou diminuírem mutuamente, dependendo de sua diferença de fases, é chamada interferência; uma escolha de termo especialmente infeliz, pois o princípio da superposição afirma que uma coisa que as ondas não fazem é "interferir". Como correntistas efetuando depósitos bancários, as ondas somam ou subtraem suas amplitudes totalmente indiferentes à presença de outra onda. Uma palavra que não tivesse conotação de estorvo ou impedimento, como "convergência", teria sido uma melhor escolha, mas vários séculos de tradição santi-

ficaram "interferência" como denominação oficial para a união, sensível à fase, das ondas oscilatórias.

O caso extremo de ondas se encontrando exatamente em fase, alcançando a intensificação máxima, é denominado "interferência construtiva". A superposição fora de fase é chamada de "interferência destrutiva".

A interferência destrutiva encontra aplicação prática no revestimento contra reflexos aplicado às lentes de máquinas fotográficas. Uma parte da luz que chega à lente é sempre refletida. Os reflexos em cada superfície comum ao vidro e ao ar, nas complexas objetivas modernas, resultaram numa séria perda de luminosidade e na formação de imagens estranhas. Esses reflexos são atenuados mediante o revestimento das superfícies da lente por um filme transparente de espessura exatamente igual a um quarto do comprimento de onda. Com isso, a luz se refletirá em outras duas superfícies —

onde o revestimento encontra o ar e onde encontra o vidro.

Pode parecer que a duplicação do número de superfícies refletoras tornaria as coisas piores, mas a interferência destrutiva virá inverter a situação. Cada superfície nova, devido ao seu espaçamento crítico, produz uma onda fora de fase com o reflexo original. Na prática, a interferência destrutiva completa só é obtida para uma cor. As outras cores, atenuadas mas não destruídas, dão às lentes revestidas a sua cor púrpura característica.

ENERGIA ONDULATÓRIA

A maior onda oceânica já registrada — mais de 60 metros de altura — apareceu em Valdez, no Alasca, em 1964. Ondas de até um metro e vinte centímetros não são incomuns nas praias. A grande onda de Valdez teria sido apenas cinquenta vezes mais poderosa do que as ondas de

todo dia?

A amplitude de uma onda dá a medida de quanto ela é grande, mas subestima grosseiramente o seu poder destrutivo. O efeito externo de uma onda depende da energia que ela transporta, e esta é proporcional à intensidade (amplitude elevada ao quadrado) da onda. *A energia de uma onda varia com o quadrado da amplitude.* Quando se dobra a amplitude de uma onda, quadruplica-se a energia que ela contém.

Embora uma onda quântica não possua energia, a sua intensidade (amplitude elevada ao quadrado) não deixa de ter uma interpretação física. Em qualquer onda quântica, a amplitude elevada ao quadrado significa *probabilidade.* Tudo o que aprendermos aqui sobre a *energia* transportada por uma onda comum será aplicável diretamente a *probabilidade* contida numa onda quântica. Uma característica comum à energia e à probabilidade é que ambas se mantêm constantes. Quando deixada por sua

conta, a energia total contida em uma onda comum nunca se altera; do mesmo modo, a probabilidade encerrada em uma onda quântica é constante.

A lei da conservação da energia é um conceito conhecido: a energia não pode ser criada nem destruída — somente é possível a transformação da energia. A conservação da probabilidade é menos conhecida: na experiência de Airy, ela significa que, se um elétron passa pelo orifício, apenas um elétron atingirá a tela. Mesmo no mundo quântico, nunca se retira nada mais (ou nada menos) do que aquilo que se introduziu.

Imaginemos, por enquanto, que estamos lidando com ondas comuns, para as quais o quadrado da amplitude significa energia, e examinemos o que acontece a essa energia durante o processo da interferência.

Uma onda de amplitude unitária possui 1^2, ou seja, uma unidade de energia. Ela transporta

essa unidade de energia para onde for.

Suponhamos que essa onda aja sobre outra onda de amplitude unitária e que em determinado lugar ambas se encontrem em fase. Na adição de ondas em fase, as amplitudes se somam como $1 \Theta 1 = 2$. A onda resultante possuirá 2^2, ou seja, *4* unidades de energia. Contudo, cada onda traz apenas uma unidade de energia; juntas, trazem duas unidades.

Devido à maneira como as ondas se somam, *quatro* unidades de energia surgem no local da interferência — duas unidades de energia surgiram do nada! O processo de interferência em fase (interferência construtiva) conduz a um excesso local de energia: sai mais energia do que entra.

Examinemos o equilíbrio energético da interferência destrutiva. Novamente, cada onda traz uma unidade de energia, perfazendo um total de duas unidades. Na adição de ondas de fase, as amplitudes se combinam segundo $1 \Theta 1$

= *0*. Assim, a onda resultante possui 0^2, ou zero unidades de energia.

Duas unidades de energia entram no local da interferência; zero unidades saem — duas unidades de energia desapareceram no ar! O processo de adição de ondas fora de fase (interferência destrutiva) conduz a um déficit local de energia: entra mais energia do que sai.

ADIÇÃO DE ONDAS DE FASE ALEATÓRIA

Além da adição de ondas em fase e fora de fase, podemos imaginar somá-las sem considerar a fase. Uma fase aleatória ocorre quando o tempo de uma onda flutua durante o curso da medição. Considerando que a adição de fase aleatória envolve uma mistura desordenada de todas as fases possíveis, poderíamos esperar que o resultado dessa adição de ondas se situe em algum ponto entre os extremos de interferência

perfeita c e imperfeita *d.* Isto é, para a superposição aleatória de duas ondas de amplitude unitária, imaginamos que a amplitude da nova onda estará entre os extremos zero e dois. Quando realmente efetuamos uma soma aleatória obtemos:

$1 \oplus 1 = \sqrt{2}$ (adição de amplitudes de fase aleatória)

A adição de duas ondas de amplitude unitária de fase aleatória dá uma onda resultante cuja amplitude é a raiz quadrada de dois (aproximadamente 1,4).

Como fizemos antes, investiguemos como a energia se comporta durante essa superposição de ondas. Cada onda unitária entra com uma unidade de energia — um total de duas unidades, consideradas as duas ondas. A saída de energia é exatamente o quadrado da amplitude resultante, ou seja, duas unidades de energia. Entram duas unidades; saem duas unida-

des. *A conservação de energia é perfeita no caso de superposição aleatória de ondas*.

Quando duas ondas se encontram, elas formam um padrão de interferência de listras claras e escuras, constituído de regiões alternadas de interferências construtivas e destrutivas. Nas regiões de interferência *c***,** aparece *mais energia* do que a trazida pelas duas ondas; nas regiões de interferência *d***,** aparece *menos energia* do que a trazida pelas duas ondas. No padrão de interferência, a energia local não é conservada; há excesso de energia nas regiões c e déficit de energia nas regiões *d.* Contudo, se verificarmos cuidadosamente as contas, descobriremos que, no computo geral, nenhuma energia foi ganha ou perdida: a energia que falta nas regiões *d* é exatamente igual à que sobra nas regiões *c.* Embora redistribua desigualmente a energia das ondas, a interferência ondulatória, como qualquer outro processo físico, obedece à lei da conservação (total) da energia.

A experiência de Airy mostra um padrão de interferência típico: o pico central e os círculos brilhantes são regiões de excesso de energia; os anéis escuros são regiões de déficit de energia. Do orifício sai mais energia do que a que chega aos anéis escuros; a energia ondulatória apontada naquela direção se cancela devido à interferência destrutiva. A Fig. 5.1 interpreta o padrão de Airy como uma alteração das adições de ondas em fase e fora de fase. Para se ver a conservação da energia em ação, tornamos aleatórias as fases dos elétrons na experiência de Airy. Ao invés da alternância de excessos e déficits de energia, esta é conservada em todos os locais. Os picos do padrão de Airy se atenuam; seus vales se erguem: o padrão de interferência se transforma num borrão uniforme. Note-se contudo que, embora a interferência seja destruída pelo fato de termos tornado aleatórias as fases, a difração não é *destruída:* o padrão conserva a sua extensão. A capacidade

das ondas para contornarem os cantos não depende de sua fase.

Quando ondas comuns se superpõem, possuindo fases definidas, as energias não se somam em todos os pontos. Quando essas mesmas ondas se superpõem, em fases aleatórias, as energias se somam em todos os pontos.

Quando ondas quânticas se superpõem, possuindo fases definidas, as probabilidades não se somam em todos os pontos. Quando essas mesmas ondas se superpõem, em fases aleatórias, as probabilidades se somam em todos os pontos. No Capítulo 8 veremos que alguns físicos acreditam que a diferença qualitativa entre adições de ondas aleatórias e coerentes tem-consequências importantes para a localização da linha divisória entre a realidade quântica e a realidade comum.

A. ONDAS COERENTES
BARREIRA
COM ORIFÍCIO
TELA DE
FÓSFORO
B. ONDAS ALEATÓRIAS
BARREIRA
COM ORIFÍCIO
TELA DE
FÓSFORO

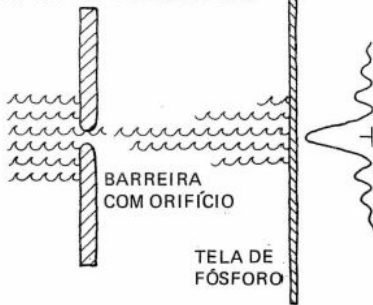
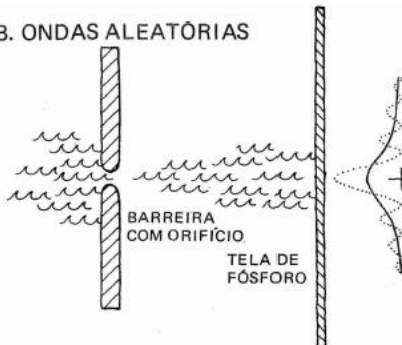



Fig. 5.1. Superposição coerente e superposição aleatória. A. Ondas ordenadas (coerentes) produzem um padrão de interferência. B. A interferência desaparece quando suas fases são embaralhadas ao acaso. No caso A a energia não se conserva localmente: excessos de energia ocorrem nas regiões de interferência construtiva; déficits de energia ocorrem nas regiões de interferência destrutiva. No caso B, a energia local é conservada em todos os pontos. Nos dois casos, a energia total (somatório de todas as energias locais) é conservada.

O TEOREMA DE FOURIER

Em 1798, Joseph Fourier, talentoso matemático francês, acompanhou Napoleão em sua aventura ao Egito. Ele serviu dois anos como governador do Egito Meridional e, em 1801, voltou à França com uma cópia da pedra de Rosetta. Examinando esse objeto no estúdio de Fourier, um menino de doze anos chamado Jean François Champollion ficou fascinado pela escrita pictórica gravada na pedra, e jurou traduzi-la um dia. Vinte anos mais tarde, Champollion alcançou o seu objetivo, e tornou-se a primeira pessoa, em três mil anos, a ler os hieróglifos

egípcios.

Champollion decifrou uma linguagem arcaica, abrindo para a cultura moderna as portas do Antigo Egito. Fourier, o homem que mostrara a Champollion a pedra de Rosetta, foi, por sua vez, o descobridor de uma nova linguagem cujos elementos não são hieróglifos, mas formas ondulatórias. O teorema de Fourier, chave da nova linguagem, é a pedra fundamental de todas as ciências baseadas nas ondas, incluindo a teoria das comunicações, a ótica moderna, a reprodução do som, a oceanografia, e a teoria quântica.

Fourier desenvolveu a sua linguagem ondulatória para lidar com as ondas térmicas. O calor, como força impulsionadora oculta por trás da emergente revolução industrial, constituía um mistério excitante para os físicos e engenheiros do século XIX. Lord Kelvin, o decano dos físicos ingleses, qualificou *La Theorie Analytique de la Chaleur,* o elegante estudo

matemático de Fourier sobre o fluxo térmico, como "um grande poema matemático". O teorema de Fourier afirma que *qualquer onda pode ser expressa mediante uma única soma de ondas senoidais*.

A onda senoidal é uma espécie de arquétipo ondulatório; seu perfil curvilíneo é o que a maioria das pessoas têm em mente quando visualizam uma onda. As cordas em vibração e as pequenas ondulações em um lago tomam a cada momento a forma de ondas senoidais. Para se ver uma onda senoidal imóvel, basta que estiquemos uma mola (ou qualquer outra hélice) e a olhemos de lado.

Os físicos gostam dessa forma ondulatória porque, quando inserem uma onda senoidal num sistema linear, sempre obtêm uma onda senoidal similar. Os sistemas lineares alteram a amplitude e a fase de uma onda senoidal, pias nunca alteram a sua forma. Os matemáticos gostam das ondas senoidais porque, não impor-

ta quantas vezes as derivem, o resultado será sempre uma outra onda senoidal. Após relacionar os atributos especiais dessa popular forma ondulatória, E.A. Guiliemin celebrou a onda senoidal com palavras incomumente coloridas, para um engenheiro eletricista: "A onda senoidal se destaca como aquela que será para sempre rainha e soberana." Pode-se quase ouvir a fanfarra dos clarins.

Imaginemos uma onda *w* estendendo-se no espaço. Essa onda *w* não é necessariamente oscilatória e pode assumir uma forma qualquer. O teorema de Fourier diz que a onda *w* pode ser expressa como o somatório de ondas senoidais de diferentes frequências espaciais *k,* amplitudes *a* e fases *p.* Cada termo da linguagem ondulatória senoidal de Fourier é uma onda senoidal com valores diferentes para *k, a* e *p*. Traduzir uma onda em termos ondulatórios senoidais é o que se chama fazer a análise de Fourier. A onda *w,* submetida à análise de Fourier, teria esque-

maticamente o seguinte aspecto:

$$w = (kap)1\ \Theta\ (kap)\ 2\ \Theta\ (kap)3\ \Theta\ (kap)4\ \Theta..,$$

As ondas senoidais particulares, que descrevem a onda **w,** constituem o seu espectro de Fourier, também denominado, por vezes, receita de vibração. Cada receita de vibração é única: há somente uma maneira de traduzir uma onda nessa linguagem ondulatória senoidal. O ponto essencial dessa importante descoberta de Fourier é o fato de que as ondas senoidais formam um alfabeto universal com o qual se pode expressar qualquer onda.

Os cientistas têm analisado as ondas sonoras produzidas por diversos instrumentos musicais em termos do alfabeto ondulatório senoidal de Fourier. Ainda quando reproduz a mesma nota, cada instrumento emite o seu "timbre” próprio — uma diferença que se reflete em sua receita de vibração. Cada instrumento deixa no

ar a sua "impressão digital de Fourier".

Quando achamos que o som de um piano é diferente do som de um cravo, nosso cérebro pode estar sendo influenciado, não pelas formas ondulatórias diferentes, mas pelos diferentes espectros de Fourier. A evidência fisiológica (tanto quanto nossa própria experiência) indica que o ouvido humano é sensível ao conteúdo ondulatório senoidal do som. Enroscada atrás do tímpano, a cóclea, um pequenino órgão em forma de caracol, transforma o som em impulsos elétricos - código cerebral para as sensações auditivas. Cada ponto ao longo da cóclea reage a uma frequência ondulatória senoidal específica. Esse pequeno caracol em nosso ouvido funciona como um analisador de Fourier.

Assim como uma onda pode ser dividida em ondas senoidais, essa mesma onda pode ser recomposta a partir de ondas senoidais, numa operação denominada "síntese de Fourier". O teorema de Fourier nos ensina a construir qual-

quer onda imaginável, a partir das ondas senoidais.

A SÍNTESE DA MÚSICA

Até recentemente, o som da música estava restrito às qualidades tonais que podiam ser produzidas pelos instrumentos existentes. *Hoje, o* teorema de Fourier fornece o método, e os osciladores transistorizados de baixo custo fornecem os meios, para a criação de timbres inteiramente novos — sons impossíveis de serem produzidos por meios mecânicos. Os compositores da Música Nova extraem o som diretamente das ondas senoidais, nos teclados dos sintetizadores eletrônicos.

O sintetizador eletrônico de música é constituído de osciladores de ondas senoidais cujas amplitudes e frequências podem variar segundo as prescrições de uma receita de vibração. Cada oscilador, vibrando com uma amplitude

selecionada, produz ondas senoidais que são combinadas em um misturador para criarem o timbre desejado — seja a imitação de um instrumento existente ou, o que é mais comum, algum som eletrônico inteiramente original.

Os instrumentos eletrônicos baseados na síntese de Fourier são denominados sintetizadores analógicos e foram desenvolvidos nos primeiros anos da década de 60 pelos pioneiros da Música Nova: Robert Moog, Donald Buchla e Paul Ketoff. Os sintetizadores digitais, mais recentes, constroem a música, não a partir das ondas senoidais, mas de formas ondulatórias denominadas ondas de impulso. Uma onda de impulso é um espigão de som infinitamente delgado.

Para visualizarmos a análise digital, imaginemos uma onda **w** submetida a um cortador de salame. A máquina corta a onda em formas ondulatórias extremamente delgadas (ondas de impulso) que tem, cada uma, a amplitude da

onda w em cada ponto. À medida que cada fatia de onda é destacada, registramos sua amplitude mediante a anotação de um número numa lista. Esses números são a receita digital da onda, ou seu espectro de impulso. Marcando esses números num gráfico obtemos uma curva exatamente igual à onda original; o espectro de impulso de uma onda w é idêntico ao formato espacial da onda **w.**

A síntese digital implica em seguir a receita digital da onda, produzindo uma sequência de pulsações estreitas, cujas amplitudes obedecem aos números da lista. A síntese digital recria o salame, gerando uma série de fatias do mesmo tamanho das originais.

Os sintetizadores (analógicos) de Moog possuem, normalmente, algumas dezenas de osciladores de ondas senoidais — um número suficientemente pequeno para poder ser sintonizado manualmente. Os sintetizadores digitais precisam gerar dezenas de milhares de "fatias"

para reproduzir um som que dura apenas uma fração de segundo. A única maneira prática de se lidar com tantos números é introduzi-los em uma memória de computador. Os sintetizadores analógicos lembram um quarteto de barbearia — um punhado de vozes cantando em coro; os sintetizadores digitais **SÃO** computadores plenamente desenvolvidos.

OS PRISMAS DE NEWTON

A partir de 1822, quando Fourier publicou um famoso tratado sobre o calor, a análise da onda senoidal desenvolveu-se a ponto de se transformar em uma das mais valiosas ferramentas da ciência, com milhares de aplicações práticas. Recentemente, as técnicas de Fourier proliferaram devido ao desenvolvimento dos programas computacionais que, com grande rapidez, decompõem as ondas complexas em suas ondas senoidais componentes.

A análise das ondas é relativamente nova no processo das descobertas científicas. Contudo, mais de um século antes de Fourier, Isaac Newton efetuara uma famosa experiência que prenunciava a nova linguagem ondulatória do sábio francês. Fazendo passar a luz do sol através de um prisma voltado para cima, e fazendo surgir as conhecidas cores do arco-íris, Newton mostrou que a luz branca é composta de cores. Newton chamou-as de "spectrum", que em latim significa "aparição”, e demonstrou, ainda, que essas cores podiam ser combinadas, refazendo a luz branca, mediante um segundo prisma, invertido.

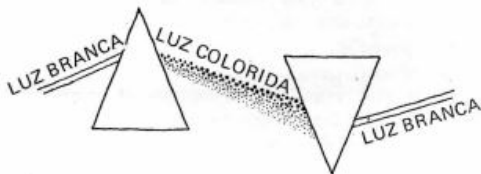
Imitando Newton, simbolizaremos os analisadores espectrais — sejam de ondas de impulso, ou de ondas senoidais — por um prisma voltado para cima. O analisador espectral divide a onda em duas formas ondulatórias componentes — ondas senoidais, no caso de um analisador de Fourier. Representaremos a forma on-

dulatória resultante típica por duas linhas paralelas: uma linha cheia para a amplitude e uma linha pontilhada para a fase, como lembrete de que as ondas possuem esses dois atributos. Embora somente as ondas oscilatórias possuam ciclos, a defasagem no tempo fará o papel da fase nas ondas não oscilatórias. Para completar o quadro, os sintetizadores espectrais serão representados por prismas invertidos. A Fig. 5.2 exemplifica essa convenção gráfica.

O TEOREMA SINTETIZADOR

A síntese de Fourier constrói as ondas utilizando um alfabeto de ondas senoidais; a síntese digital cria as mesmas ondas a partir das formas ondulatórias de impulso. Se a mesma onda pode ser sintetizada através de dois modos diferentes, por que não tentarmos outros modosΔ Os matemáticos, em sua tentativa de aplicar o teorema de Fourier a novas áreas, fizeram uma

importante descoberta: quase todas as famílias de formas ondulatórias poderão servir como alfabeto básico de uma linguagem ondulatória.

A. EXPERIÊNCIA DE NEWTON

B. ANÁLISE/SÍNTESE DE FORMAS ONDULATÓRIAS

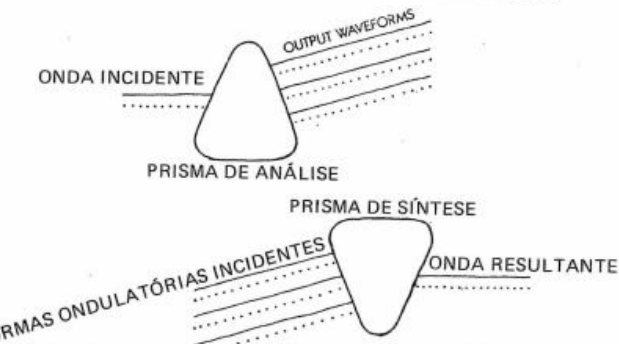



Fig. 5.2. A. A decomposição da luz branca em cores diversas, efetuada por Newton, foi um exemplo pioneiro de análise das ondas. B. Imitando Newton, utilizamos um prisma voltado para cima, a fim de simbolizar a decomposição de uma onda em elementos de um alfabeto constituído de formas ondulatórias quaisquer — não apenas de ondas senoidais. As ondas incidentes no prisma, bem como as ondas resultantes, são representadas por uma linha dupla: a linha cheia representa a amplitude da onda e a linha pontilhada a sua fase. Um prisma invertido simboliza a síntese de uma onda a partir dos membros de uma família qualquer de formas ondulatórias, não apenas da família de ondas senoidais. A máquina que decompõem fisicamente as ondas reais sem elementos de um alfabeto de formas ondulatórias é denominada "hardprisma" — simbolizado por um triângulo de vértices agudos; o programa de computador que decompõe matematicamente uma forma ondulatória em formas ondula-

Essa descoberta - que chamaremos de teorema sintetizador - indica que a onda **W** pode ser expressa não só como uma soma de ondas senoidais ou ondas de impulso, mas como soma de ondas de piano, ou ondas de flauta ou ondas de tuba ou misteriosas formas ondulatórias ainda sem nome.

O teorema sintetizador diz que, além do que concerne ao fornecimento de um alfabeto básico para as ondas, nada há de especial com as ondas senoidais de Fourier. Qualquer outra forma ondulatória será tão boa quanto aquelas. Em virtude do teorema sintetizador, uma determinada onda poderá ser decomposta de muitas maneiras diferentes — tantas maneiras quantas forem as famílias de ondas ondulatórias existentes. Isso significa que não há uma maneira "natural" para se desintegrar uma onda. Ao contrário do que acontece com um relógio, que se decompõe em engrenagens e molas, de uma

só maneira, uma onda não possui peças intrínsecas.

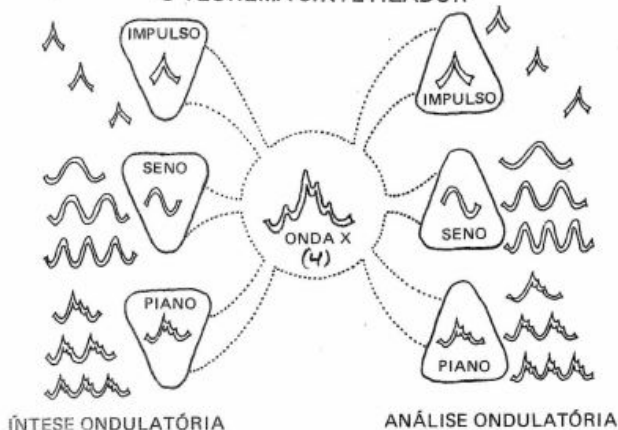



Fig. 5.3. Teorema sintetizador: uma onda de formato qualquer pode ser construída (síntese) a partir da adição de formas ondulatórias pertencentes a qualquer família de formas ondulatórias — uma propriedade inata das ondas, que poderíamos denominar "liberdade de associação"; do mesmo modo, uma onda de formato qualquer pode ser decomposta (análise) em uma soma de formas ondulatórias pertencentes a qualquer família de formas ondulatórias. O teorema sintetizador diz que um mesmo formato de onda pode ser analisado/sintetizado em termos de uma variedade de alfabetos diferentes constituídos de formas ondulatórias: em resumo, uma onda não possui peças intrínsecas.

FAMÍLIAS DE FORMAS ONDULATÓRIAS

Os membros de uma família humana partilham algumas características comuns a todos, mas, ainda assim, cada um deles é um só indivíduo. O nome de família de um dos membros indica qual o grupo a que ele pertence; o nome pessoal de cada membro identifica-o no grupo. 0 mesmo acontece com as formas ondulatórias: cada membro de uma família de formas ondulatórias possui nome e sobrenome.

Tomemos, por exemplo, a *família das ondas de impulso*. Todas as ondas de impulso têm exatamente a mesma aparência — uma onda infinitamente estreita, semelhante a um espigão. As ondas de impulso se diferenciam apenas pela sua localização. A posição **x** de uma onda de impulso é o seu nome próprio, que a distingue de outros membros da família que residem em outros locais.

A *família de ondas senoidais espaciais* é constituída de oscilações regulares estendidas no espaço de um horizonte a outro. Todas as ondas senoidais possuem o mesmo formato, mas diferem quanto à frequência espacial. A *frequência espacial k* é o nome próprio de uma onda senoidal espacial.

A *família de ondas senoidais periódicas é* constituída de vibrações regulares no tempo, que se distinguem umas das outras por sua frequência **F.**

A *família das formas ondulatórias harmônicas esféricas* é constituída pelas vibrações naturais de uma esfera oca. 0 nome próprio de um harmônico esférico é formado de dois números inteiros nem que distinguem um harmônico esférico dos outros membros de sua família. Mais informações sobre essa ilustre família de formas ondulatórias podem ser encontradas no final deste capítulo.

De acordo com o teorema sintetizador, uma

onda w pode ser expressa mediante um alfabeto constituído de formas ondulatórias, retirado de um número infinito de famílias de formas ondulatórias. Contudo, para cada onda em particular, existem duas famílias de formas ondulatórias com as quais a onda possui um relacionamento especial. Existe uma família que lhe é, num certo sentido, a mais próxima de todas, e uma outra que lhe é a mais distante.

Analisar uma onda W é dividi-la em suas formas ondulatórias componentes, fazendo-a passar através de um prisma de determinada família de formas ondulatórias, que divide qualquer onda em formas ondulatórias puras pertencentes à família do prisma. Ao analisarmos a onda W com diferentes prismas, notamos que alguns prismas a dividem em umas poucas formas ondulatórias, e outras dividem-na em muitas formas ondulatórias. O número de formas ondulatórias em que um prisma divide uma onda é denominado largura espectral da onda, ou,

às vezes, faixa espectral.

A extensão dessa faixa espectral mantém uma relação inversa com a "semelhança" entre a onda *w* e a forma ondulatória do prisma que a está dividindo. Quanto menor a faixa, mais a onda w se assemelha às formas ondulatórias do prisma; quanto maior a faixa, menor a semelhança familiar. Por exemplo, se fizermos uma onda W passar por um prisma de sua própria família (chamemo-la de família W), essa análise produzirá uma só forma ondulatória: a própria onda W - a menor faixa possível. Chamemos esse prisma - o prisma que simplesmente não divide a onda W - de seu prisma afim. As formas ondulatórias associadas a esse prisma são as do seu próprio tipo, a família à qual ela pertence.

Por outro lado, entre todas as famílias de formas ondulatórias existentes no mundo, existe uma (a família M), cujo prisma fornece a maior faixa possível quando usado para anali-

sar a onda W. Os membros da família M são os que menos se assemelham a W. Chamamos esse prisma - o prisma que divide a onda W no maior número de componentes - de seu prisma conjugado.

Podemos imaginar todas as famílias de formas ondulatórias habitando um espaço ondulatório esférico semelhante à superfície da Terra. As famílias que se assemelham à família W vivem na mesma vizinhança; as famílias diferentes de **W** vivem mais longe. A família mais afastada de W é a sua família conjugada M**,** que vive na região antípoda — exatamente no outro lado do mundo.

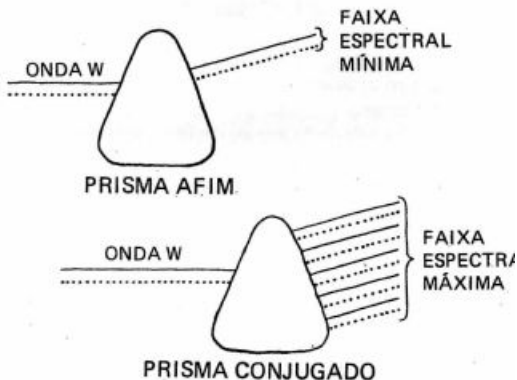



Fig. 5.4. Prisma afim e prisma conjugado. O prisma afim de uma onda é o prisma analisador que divide a onda no menor número possível de componentes; o prisma conjugado de uma onda é o prisma analisador que divide a onda no maior número possível de componentes. Uma onda pertence à família de formas ondulatórias do seu prisma afim, e se assemelha o menos possível aos membros da família de formas ondulatórias que lhe é conjugada.

Assim como cada onda pertence a uma só família de formas ondulatórias, também cada família de formas ondulatórias possui uma família conjugada cujos membros são os opostos polares da primeira.

A família das ondas senoidais (a base da síntese analógica da música) é constituída de ondas que oscilam suavemente, sem princípio nem fim. A forma ondulatória conjugada da onda senoidal é a onda de impulso (a base da síntese digital). Uma onda de impulso é um espigão delgado e isolado, de duração mensuravelmente pequena. Dificilmente, poderíamos imaginar duas ondas tão diferentes quanto essas formas ondulatórias conjugadas — as ondas senoidais e as ondas de impulso.

Consideremos um par de famílias de formas ondulatórias conjugadas *W* e *M*, que residem, necessariamente, em regiões opostas do seu espaço ondulatório esférico. Imaginemos que se faça passar uma onda arbitrária *X* em cada um desses prismas de famílias polarmente opostas.

Quando fazemos *X* passar por um prisma *W*, obtemos uma determinada faixa ΔW de formas ondulatórias *W*, essa faixa nos dá a medida

inversa do quanto a onda incidente *X* se assemelha aos membros da família de formas ondulatórias W**.** Quando fazemos *X* passar por um prisma *M* obtemos uma determinada faixa *ΔM* de formas ondulatórias M**;** essa faixa nos dá a medida inversa do quanto a onda incidente *X* se assemelha à família de formas ondulatórias *M*.

Como W **e** M são opostas polares, não haverá qualquer possibilidade de que a onda **X,** por mais distorcida que seja a sua forma ondulatória, tenha com ambas o mesmo grau de semelhança. Consequentemente, haverá necessariamente algum limite inferior para a largura dessas duas faixas espectrais relativas a uma mesma onda incidente. De fato, existe uma regra que expressa a impossibilidade de se tornarem concomitantemente pequenas as duas faixas espectrais relativas a uma mesma onda. Essa regra tem o seguinte espectro:

$$\Delta W.\ \Delta M > 1$$

Para qualquer onda **X,** o produto de suas faixas espectrais *W e M* — sendo *W e M* famílias de formas ondulatórias conjugadas — nunca poderá ser inferior a 1.

Considerando que o produto de duas faixas espectrais é uma espécie de área espectral, o conteúdo dessa regra é tal que, para qualquer onda **X, A** área espectral de **X** deverá exceder uma unidade de espaço espectral. Se quisermos produzir uma onda — não importa a forma que ela terá — precisaremos dispor de uma certa quantidade mínima de "hectares espectrais". Como essa regra lembra uma espécie de código de obras para o espaço espectral, chamemo-la de código de área espectral. Um exemplo da aplicação do código de área espectral é a complementaridade das capacidades técnicas de sínteses analógica e digital.

CÓDIGO DE ÁREA ESPECTRAL

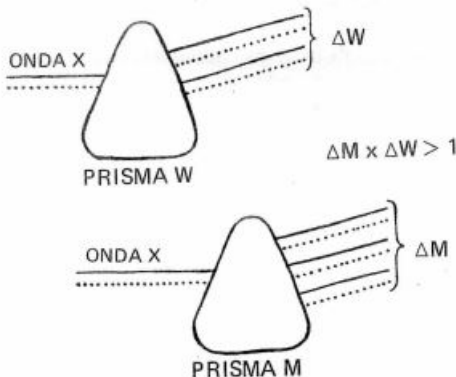



Fig. 5.5. Código de área espectral. Nenhuma onda X pode se assemelhar tanto à forma ondulatória W quanto à sua forma ondulatória conjugada M: quanto mais se assemelha a W, menos se parece com M. Em termos de faixas espectrais, essa restrição lógica exige que o produto das faixas W e M de uma mesma onda X — que pode ser chamado de área espectral da onda — nunca seja inferior a uma certa constante, cujo valor é fixado, pela natureza, para cada onda.

Um sintetizador analógico produz uma onda sonora *X* com base numa série de ondas senoidais de diferentes frequências espaciais *k*.

Cada onda *X,* dependendo de seu formato, requer uma certa faixa espectral Δk de formas ondulatórias senoidais para a sua adequada síntese analógica.

A forma ondulatória conjugada da onda senoidal é a onda de impulso, base da síntese digital de música. O sintetizador digital produz uma onda *X* partindo de uma série de ondas de impulso de diferentes valores de posição *x*. Cada onda, para sua adequada síntese digital, requer uma determinada faixa espectral Δx de ondas de impulso.

O código de área espectral impõe restrições mútuas sobre as faixas analógica e digital de qualquer forma ondulatória *X*:

$\Delta \kappa \,.\, \Delta x > 1$ (código de área espectral para a síntese analógica/digital).

Os breves sons musicais de percussão, como o de castanholas, triângulo, bloco de ma-

deira, etc., possuem um espectro de impulso estreito, uma vez que suas formas ondulatórias ocupam pouco espaço. Para uma síntese analógica apropriada desses sons secos, o código de área espectral exige uma ampla série de ondas senoidais. Para a síntese de um som infinitamente breve, i.e., a própria onda de impulso, seriam necessárias todas as frequências possíveis de ondas senoidais.

Por outro lado, os sons musicais que constituem tonalidades quase puras, tais como o de flautas, órgãos, diapasões, etc., possuem um espectro senoidal estreito. Para a síntese digital apropriada desses sons puros, o código de área espectral exige uma ampla série de ondas de impulso.

O código de área espectral nos diz que os sintetizadores de música analógicos e digitais são complementares num sentido especial: uns são bons para a síntese de formas ondulatórias longas, os outros são bons para as curtas. O có-

digo de área espectral constitui uma característica básica de todas as ondas, tão inseparável de sua natureza ondulatória quanto a difração e a interferência. Esse código é importante na ótica, onde limita o poder de resolução dos microscópios, na teoria das comunicações, onde fixa a faixa dos canais de TV, e em outras numerosas operações baseadas nas ondas. Conforme veremos, o código de área espectral, quando aplicado às ondas de substância quântica, conduz diretamente ao princípio da incerteza de Heisenberg.

Embora a sua aplicação às ondas comuns seja conhecida há mais de um século, esse código nunca recebeu um nome apropriado. Hoje, devido a uma defeituosa formação semântica, um número cada vez maior de livros didáticos sobre a teoria das ondas comuns se refere a essa natural limitação das faixas espectrais mútuas como sendo o princípio da incerteza, a despeito do fato de que, em sua aplicação às ondas co-

muns, ela nada tenha a ver com a incerteza.

Sempre que é medido, o mundo parece ser sólido (partículas), mas o padrão formado por essas partículas leva à conclusão de que, entre as medições, o mundo age como uma onda. Seguindo essa tendência, a teoria quântica representa o mundo não medido como uma onda de comportamento idêntico ao das ondas comuns, mas interpretada de maneira decididamente não comum. Este breve levantamento do comportamento básico das ondas teve a intenção de nos fornecer um terreno sólido, de onde possamos nos aventurar no território escorregadio da interpretação quântica.

EPÍLOGO: UMA FAMÍLIA DE ONDAS ESFÉRICAS

Observando as gotas que pingam de uma bica defeituosa, iluminadas pelos clarões repetidos de uma luz estroboscópica, temos a ilusão de

estar vendo, imóveis no ar, bolinhas de água isoladas e trementes. A oscilação das gotículas de água pode ser apropriadamente explicada em termos de uma família de formas ondulatórias denominada harmônicos esféricos.

Assim como as ondas senoidais são as vibrações naturais de uma corda esticada, os harmônicos esféricos são as vibrações naturais de uma esfera elástica. Sendo o seu formato o de uma bola, é quase certo que algum cientista já a tenha descrito através do alfabeto ondulatório harmônico esférico. Os membros dessa família de formas ondulatórias reproduzem a imagem da Terra com seu campo magnético, o padrão de radiação em torno de uma antena de TV, as oscilações das gotas de chuva e dos núcleos atômicos, o arfar das marés oceânicas, e a agitação de numerosos ressonadores esféricos desde os gongos dos templos até à fervente superfície do sol.

Além do nome de família, cada esférico

harmônico possui dois nomes próprios que o distinguem das demais formas ondulatórias da família. Quando uma esfera entra em vibração, determinados círculos nodais aparecem onde a superfície esférica permanece imóvel. De um lado do círculo nodal, a superfície da esfera se move para dentro; do outro lado dessa fronteira, a esfera se move para fora.

O primeiro nome de um harmônico esférico (comumente denominado sua "ordem") é um número n que indica o seu número total de círculos nodais. O harmônico esférico mais simples não possui círculos nodais (n=0): a esfera inteira se contrai e se expande como um todo — um tipo de movimento esférico denominado "modo respiratório". Cada esférico harmônico possui um eixo de simetria definido, como o eixo da Terra, pelos polos norte e sul. O segundo nome de um esférico harmônico (comumente denominado seu "grau") é um número *m* que indica o número dos seus círculos no-

dais que passam pelos polos. Uma das características gerais da vibração esférica é que, se um círculo nodal não passa pelos polos, ele estará necessariamente contido num plano paralelo ao equador. Consequentemente, todos os círculos nodais são linhas de latitude ou longitude definidas.

FORMAS ONDULATÓRIAS HARMÔNICAS ESFÉRICAS

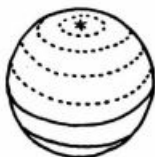
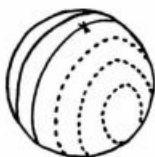



Fig. 5.6. Família de formas ondulatórias harmônicas esféricas. Os membros dessa famosa família — vibrações naturais de uma esfera elástica — são identificados por um número *n* que indica a quantidade de círculos nodais que possui, e um número *m* que indica a quantidade de círculos nodais que passam nos pólos da esfera.

Por exemplo, o harmônico esférico identificado por n=5, m=4 (quinta ordem, quarto grau) tem um total de cinco círculos nodais, dos quais quatro passam pelos polos. O círculo nodal extra será necessariamente uma linha de latitude que, por razões de simetria, passa pelo equador. Dois números são suficientes para relacionar todos os membros de uma família de ondas ondulatórias harmônicas esféricas. Ninguém fica de fora.

Excetuadas as ondas senoidais, nenhuma família de formas ondulatórias é tida em mais alta consideração pelos cientistas que se dedicam às ondas do que os harmônicos esféricos. Em virtude do teorema sintetizador, qualquer vibração esférica, por mais complicada que ela seja, pode ser expressa mediante o alfabeto de formas ondulatórias harmônicas esféricas. O comportamento dessas úteis formas ondulatórias tem sido estudado por mais de um

século. O fato de que os nomes próprios dos harmônicos esféricos são números inteiros é especialmente importante para o objetivo da teoria quântica.

Todas as famílias de formas ondulatórias anteriormente consideradas possuem uma série contínua de nomes - grandezas que, como a frequência espacial, podem assumir qualquer valor numérico. Ao contrário, os harmônicos esféricos possuem nomes próprios descontínuos. As famílias de formas ondulatórias com nomes descontínuos são como os instrumentos (violão, trompete, piano) que podem produzir apenas um número limitado de notas, comparados aos instrumentos (violino, trombone, voz humana) que podem produzir qualquer nota. Conforme veremos, o fato de que algumas famílias de formas ondulatórias têm nomes descontínuos significa que, quando aplicadas às ondas quânticas, certos atributos físicos terão necessariamente valores descontínuos.

6. Conheça o Vencedor: A Teoria Quântica (Ela Própria)

> Sou ordeiro por natureza e, por isso, inclinado a rejeitar todas as aventuras duvidosas. Mas era necessário encontrar uma interpretação para a teoria, a qualquer custo, por mais alto que fosse... Estava pronto a sacrificar cada uma das minhas prévias convicções relativas às leis físicas.
>
> Max Planck

Uma pessoa que visitava Niels Bohr em sua casa de campo interpelou-o a respeito de uma ferradura pregada sobre a porta da frente. "Com efeito, Professor Bohr, o senhor acredita realmente que uma ferradura em cima da porta de uma casa pode trazer boa sorteΔ" "Não", respondeu Bohr, "é claro que não creio nessa superstição. Mas

você sabe", acrescentou, "dizem que ela traz sorte mesmo quando não se crê".

A teoria quântica é como a ferradura na casa de Bohr: ela funciona, independentemente daquilo em que se creia. Um teórico quântico pode imaginar que está desvendando os destinos de mundos múltiplos; outro acha que está raciocinando segundo a lógica quântica. A despeito das diferentes noções acerca do que estão fazendo (indicativas de quanto os físicos estão confusos a respeito do verdadeiro significado da teoria quântica), ambos chegarão ao mesmo resultado.

A teoria quântica foi construída no final da década de 20, para lidar com o átomo, uma diminuta entidade mil vezes menor do que o comprimento de onda da luz verde. Preocupados com as implicações filosóficas da teoria quântica, muitos físicos consideravam-na, então, um instrumento provisório destinado a fracassar fora dos domínios do átomo. No entanto,

a teoria quântica continuou a prosperar, ultrapassando os mais fantásticos sonhos de seus inventores, resolvendo os sutis problemas da estrutura atômica, dominando o núcleo (cerca de dez mil vezes menor do que o próprio átomo) e, em seguida, estendendo seu raio de ação ao território das partículas elementares (quarks, glúons, léptons) que muitos creem ser as partes constituintes finais do mundo. A cada sucesso, a teoria quântica se torna mais arrojada. Os físicos quânticos, visando à conquista de novos mundos, voltaram-se para o macrocosmo e já ousam pensar em um modelo para o nascimento do próprio universo, em termos de um gigantesco salto quântico. Acumulando vitórias sobre vitórias, a teoria quântica não teme o risco de fazer afirmações falsas em mil áreas diversas. O seu registro de êxitos é impressionante: a teoria quântica passa em todos os testes que podemos imaginar. Jogando há sessenta anos, essa teoria ainda está fazendo gols às centenas.

Antes de examinarmos a questão da realidade quântica que tão nitidamente divide os físicos, comecemos por onde todos eles concordam: como utilizar a teoria quântica. De Berkeley a Gorki, os físicos quânticos preveem os fatos quânticos exatamente da mesma maneira. Neste capítulo trataremos a teoria quântica estritamente como um instrumento de previsão dos resultados experimentais, sem absolutamente questionar o seu significado.

Considerada como simples instrumento, a teoria quântica é uma receita conceituai que prevê os valores dos atributos de uma entidade quântica qualquer, em determinadas situações de medição. A teoria quântica, como foi concebida, prevê somente os resultados das medições; ela não nos diz o que acontece no intervalo entre as medições.

A teoria quântica prevê os resultados das medições com uma precisão nunca vista, mas medições são apenas uma parte do mundo. Em

quase todos os locais, e quase todo o tempo, o mundo permanece em um estado não medido. Qualquer pessoa que sinta curiosidade a respeito da realidade, quererá saber como é o mundo quando não está sendo medido. A teoria quântica não faz, diretamente, essa pergunta.

Podemos fazer uma ideia de como a teoria quântica funciona, respondendo a três questões:

1. Como a teoria quântica descreve uma entidade quântica?
2. Como a teoria quântica descreve um atributo físico?
3. Como a teoria quântica descreve uma situação pertinente a uma medição?

Uma vez entendida a maneira pela qual os físicos utilizam, de fato, a teoria quântica para prever os atributos medidos de uma entidade quântica, examinaremos algumas tentativas no

sentido de ir além da teoria quântica, e chegar ao mundo não medido.

AS ENTIDADES QUÂNTICAS

Embora o mundo outrora parecesse ser duplo, formado de partículas e campos, um exame mais minucioso revela um comportamento comum: o que anteriormente se chamava "partículas" apresenta aspectos ondulatórios; o que anteriormente se chamava "ondas" se comporta como partículas. Na verdade, tudo é feito de uma só espécie de substância, que denominamos substância quântica. A teoria quântica reflete essa unidade fundamental descrevendo todos os quons da mesma maneira. Uma só descrição se aplica a todos.

O primeiro passo da teoria quântica é associar a cada entidade quântica uma onda própria denominada função ondulatória do quon, geralmente simbolizada por ψ, ou *psi,* vigésima-

terceira letra do alfabeto grego. A maioria dos físicos trata essa função ondulatória como um simples instrumento de cálculo, e não como uma onda real localizada em algum lugar do espaço. Assim como o Presidente e os membros do Congresso representam os cidadãos individuais de maneira muito especial, porém indireta, também uma função ondulatória representa os quons individuais de maneira específica, porém indireta — uma maneira que se tornará mais clara quando tivermos visto o modo pelo qual a função ondulatória é, de fato, utilizada. Entrementes, podemos imaginar cada quon — um elétron da experiência de Airy, por exemplo — representado, por procuração, pela onda que lhe é associada e que guarda com ele uma relação ainda não especificada.

Como todas as ondas, a onda mandatária do quon goza de todas as regalias próprias da natureza ondulatória, delineadas no capítulo anterior. Em particular, a função ondulatória do

quon possui amplitude e fase, satisfaz ao princípio da superposição e ao código de área espectral, e apresenta as interferências construtiva e destrutiva dependentes da fase. Da maior importância para a teoria quântica é o fato de que a função ondulatória, em virtude do teorema sintetizador, pode ser expressa como a soma dos membros de numerosas famílias de formas ondulatórias.

O que diferencia ψ das ondas comuns é o fato de que ela não transporta energia. Para uma onda comum, o quadrado de sua amplitude dá a medida da sua energia. Para uma onda quântica, o quadrado de sua amplitude (no local *x)* representa, não energia, mas a probabilidade de que uma partícula — um pacote de energia localizada — será observada caso um detector esteja posicionado no local *x.* Por não transportar energia, a onda quântica não pode ser observada diretamente; nunca vemos uma onda quântica, vemos apenas as partículas

quânticas. Contudo, após o aparecimento de muitas partículas, podemos inferir a presença e o aspecto da onda ψ, a partir do padrão obedecido pelo comportamento da partícula. Na Fig. 4.2, por exemplo, os clarões das moléculas de fósforo desvendam a forma da onda ψ do elétron.

Devido a que ψ^2 representa a probabilidade, a função ondulatória é, muitas vezes, denominada onda de probabilidade. No entanto, é ψ e não ψ^2 o que realmente representa a entidade quântica. Procuramos respeitar essa diferença entre a função ondulatória e o seu quadrado, dando à onda mandatária o nome de onda de possibilidade — sendo a possibilidade, de algum modo, menos real do que a probabilidade. Veremos, mais adiante, o quanto é apropriado o nome "possibilidade" para esse tipo de onda. A relação entre possibilidade e probabilidade quânticas é simples:

$$probabilidade = (possibilidade)^2$$

A amplitude de uma onda quântica é a sua possibilidade. O quadrado de uma possibilidade é uma probabilidade.

Um maior número de partículas será detectado quando ψ^2 for grande; se ψ^2 for pequeno, esse número será menor. O padrão formado pelos quons detectados — clarões numa tela de fósforo, por exemplo — nos permite inferir o formato da onda de probabilidade ψ^2 e, daí, o da onda de possibilidade ψ. A posição dos clarões das moléculas de fósforo tornam ψ visível, indiretamente, do mesmo modo que as partículas de fumaça esboçam o formato das correntes de ar invisíveis. Devido a que, por assim dizer, essa onda ψ atua nos bastidores, sem transportar nenhuma energia e revelando sua presença, apenas indiretamente, mediante sua influência estatística sobre um grande número de eventos

das partículas, Einstein denominou-a *Gespensterfeld,* ou campo fantasma. Por não transportar energia, a função ondulatória é também chamada de onda vazia. Na França, a onda ψ recebeu um lindo nome — *densité de presénce,* ou "densidade de presença".

Probabilidade é a medida do número relativo de maneiras pelas quais um determinado evento pode ocorrer. A ciência da probabilidade nasceu da colaboração entre os matemáticos e os jogadores, visando a determinar as chances de se ganhar nos dados, mediante a contagem sistemática das maneiras pelas quais o resultado almejado poderia ocorrer. A probabilidade redimiu-se, há muito tempo, desse passado sombrio, e hoje tem um papel importante na economia, na indústria e na pesquisa científica. Contudo, muitas das suas aplicações ainda envolvem pouco mais do que complicados esquemas de contagem.

Por estar baseada na contagem de coisas,

a probabilidade obedece às regras da aritmética. Por exemplo: se um evento pode ocorrer de cinco maneiras diferentes e surgem três novas maneiras de ele ocorrer, o evento passa a contar com oito maneiras de ocorrer. Essa regra de adição, derivada do bom senso, e que constitui um dos aspectos fundamentais da probabilidade clássica, nem sempre é respeitada pela probabilidade quântica, que segue as leis da adição de ondas, e não as da aritmética comum.

A interferência entre as ondas não é rara; ela acontece todos os dias na nossa pia da cozinha. Contudo a interferência de ondas quânticas produz resultados estranhos. Devido ao fato de que as possibilidades quânticas se somam como as ondas, e não como as coisas, as possibilidades físicas podem desaparecer quando suas ondas representativas se encontram fora de fase.

Há não muito tempo, um simples caso de interferência de possibilidades alterou o rumo

da física das partículas elementares. Nos últimos anos da década de 60, os físicos tinham boas razões para acreditar que todas as partículas de forte interação (hadrons) seriam, de fato, formadas de umas poucas partículas realmente fundamentais denominadas quarks. Naquela época, as combinações de apenas três quarks — que se classificavam, por um número quântico de "fragrância", em altos, baixos e estranhos — eram suficientes para justificar a existência de dezenas de hadrons conhecidos.

Em 1970, o físico Sheldon Glashow, de Harvard, sugeriu a necessária existência de um quarto quark (fragrância-encanto) e estimou as propriedades, tanto desse novo quark quanto dos hadrons, ainda não descobertos, que poderiam ser construídos a partir dele. Um dos mais fortes argumentos de Glashow para a existência do quark encantado era a inexistência de uma modalidade especial de desintegração espontânea da partícula K. Como a maioria dos outros

hadrons, a partícula K é instável e se desintegra de várias maneiras, formando partículas de menor massa. A despeito das longas pesquisas efetuadas, nunca se tinha observado a desintegração da partícula K em dois muons.

De acordo com o modelo de hadrons baseado em três quarks, a estrutura da partícula hadron K exigia que ela se desintegrasse num par de muons, segundo um determinado processo — o chamado canal do quark estranho (os quarks altos e baixos não podem produzir muons). Contudo, essa modalidade de desintegração parecia não ocorrer jamais. Deveriam os físicos descartar o modelo do quark porque este previa um processo que não ocorria?

O plano de Glashow para eliminar a desintegração em dois muons não previa a eliminação dos quarks, e sim a adição de mais um. Ele defendia uma segunda maneira para a partícula K se transformar em dois muons; uma maneira que envolvia um novo quark — o chama-

do canal do quark encantado. Na física clássica, quando se dobra o número de maneiras pelas quais algo possa acontecer, espera-se que isso aconteça duas vezes mais. Mas isso não vale para a física quântica, pois esta admite o cancelamento das possibilidades. Glashow teceu as propriedades do novo quark de modo que sua onda de possibilidade tivesse a fase em oposição à da onda do quark estranho. As duas possibilidades se cancelariam, suprimindo, para a satisfação de todos, a desintegração em dois muons. Na verdade, o cancelamento não seria exato, porque os dois quarks possuem massas diferentes. Medições recentes da desintegração da partícula K revelaram algumas ocorrências do duplo muon, em número um milhão de vezes menor do que o previsto para os três quarks, mas condizente com o modelo de Glashow para quatro quarks. Tão convencido estava Glashow de que a ausência de muons indicava a presença do quarto quark que, na IV Conferência In-

ternacional de Espectroscopia do Meson (abril de 1974), ele prometeu que comeria o seu próprio chapéu se, até o próximo encontro, dali a dois anos, o quark encantado não tivesse sido descoberto.

Fig. 6.1 O mais é menos. A partícula K pode se desintegrar espontaneamente num par de muons de duas maneiras — através do canal do quark estranho ou do canal do quark encantado. Contudo, devido a que essas duas possibilidades possuem fases opostas, elas se cancelam segundo o modo peculiar ao quantum, eliminando a ocorrência da desintegração em dois muons.

Glashow não teve que comer o seu chapéu. Em novembro de 1974, foi descoberta a partícula J, o primeiro dos novos hadrons em cuja constituição aparecia o quark encantado. Subsequentemente, surgiram outras partículas encantadas. Hoje a teoria do quark é uma pedra angular da física das partículas. Os físicos teóricos preveem a necessidade de duas outras fragrâncias para o quark (superior e inferior), perfazendo ao todo seis fragrâncias. A confiança na existência dos quarks é hoje tão forte que, ao invés da expectativa provocada pela corajosa conjectura de Glashow, a confirmação dos dois novos quarks é vista como quase inevitável.

A interferência destrutiva de uma propriedade física do quark (sua capacidade para se desintegrar em dois muons) representa uma aplicação rotineira dos conceitos quânticos, efetuada nas fronteiras do presente conheci-

mento. Esse exemplo reforça nossa crença de que a teoria quântica se aplica a todas as entidades físicas sem exceção. Nenhuma entidade é tão exótica que possa escapar das regras quânticas: o quark é, também, um quon. Uma só descrição se aplica a todos.

A resposta à nossa primeira questão — Como a teoria quântica descreve uma entidade quântica? — é a seguinte: a teoria quântica não “descreve" quaisquer entidades; ela as representa. Ao invés de lidar diretamente com uma entidade quântica, a teoria quântica a substitui por uma onda mandatária ψ, cujo quadrado, em qualquer local, fornece a probabilidade de que ali (atributo de posição) se manifesta o aspecto partícula do quon e cujo formato fornece os dados relativos aos outros atributos, que não a posição, de um modo a ser mostrado em seguida.

ATRIBUTOS QUÂNTICOS

O termo de maior significação no vocabulário quântico é a palavra “atributo". A natureza extravagante da teoria quântica provém principalmente da sua maneira incomum de representar os atributos físicos.

Cada quon possui dois tipos de atributos: os estáticos e os dinâmicos. Um atributo estático tem sempre a mesma dimensão a cada vez que é medido, e isso serve para distinguir um quon de outro. Os atributos estáticos mais importantes são a massa (*M),* a carga (Q) e a magnitude do *spin* (S). Existem hoje mais de cem quons elementares, mas quando a teoria quântica foi criada, eram conhecidos somente três: o elétron, o próton e o fóton. Os valores dos atributos estáticos dessas entidades quânticas clássicas são:

QUON	MASSA	CARGA	SPIN
Elétron	1	-1	1/2
Próton	1836	+1	1/2
Fóton	0	0	1

Os atributos estáticos são eternos, mas os atributos dinâmicos de um quon se alteram com o tempo. Os principais atributos dinâmicos são a posição, a quantidade de movimento e a orientação do *spin,* que informam onde se encontra o quon, como ele está se movendo e em que direção o seu *spin* está apontando.

O atributo posição registra a localização variável de um quon. Para um quon pontual, como o elétron, a posição indica onde se pode encontrar esse ponto. Para um quon mais extenso, como o átomo, a posição se refere ao centro de massa do quon. Como o espaço possui três dimensões, convencionalmente simbolizadas por *x, y e z, o* atributo posição consiste, também, de três partes *X, Y* e *Z* que especificam uma locali-

zação do quon no espaço tridimensional.

O atributo dinâmico quantidade de movimento linear (geralmente denominada simplesmente quantidade de movimento) é simbolizado pela letra *P.* A quantidade de movimento de um quon fornece a velocidade e a direção do seu deslocamento. Como a posição, a quantidade de movimento possui três componentes, simbolizadas por $P_{x'}$ P_y e $P_{z'}$ que informam as velocidades com que o quon está se movendo nas direções *x, y* e *z.*

De forma clássica, o atributo *spin* (também chamado de quantidade de movimento angular intrínseco) é proporcional à massa da partícula e à sua velocidade angular (velocidade com que ela gira). Assim como a quantidade de movimento linear, o *spin* aponta em três direções. Por definição, os físicos consideram que o *spin* age ao longo do eixo de rotação da entidade, apontando para cima ou para baixo, dependendo do sentido de rotação (sentido dos ponteiros

de um relógio, ou sentido contrário ao dos ponteiros de um relógio). Segundo essa convenção, o *spin* da Terra se assemelha a uma seta paralela ao seu eixo, apontando para o Pólo Norte.

O *spin* é uma seta que pode apontar em qualquer direção; os símbolos $S_{x'}$ S_y e S_z identificam os componentes do atributo orientação do *spin* nas direções *x, y ez.* Um modo adimensional, e conveniente, de nos referirmos ao *spin* é o de especificar a fração do *spin* total que aponta em cada direção. Por exemplo, o *spin* pode apontar 50% na direção *x* e 25% em cada uma das direções *y ez.*

O *spin* da Terra, por exemplo, é inclinado em relação ao eixo da eclíptica (eixo do movimento da Terra em torno do sol) em cerca de 23 graus, fato este que dá origem às estações do ano. Para essa inclinação de 23 graus, a fração do *spin* da Terra que aponta ao longo do eixo da eclíptica é de 85%. Se chamarmos esse eixo de *z,* o atributo orientação do *spin* da Terra, S_z,

será igual a 0,85. Os 15% restantes do *spin* da Terra ficarão distribuídos entre os atributos S_x e S_y.

Além da orientação do *spin,* um corpo possui ainda a magnitude S do *spin*. Um objeto pesado, girando rapidamente, como a Terra, possui um *spin* de grande magnitude; um objeto leve, girando lentamente, como um floco de neve, possui um *spin* de pequena magnitude.

Ao contrário da Terra e do floco de neve, que podem ter várias magnitudes de *spin,* um quon elementar não pode alterar a magnitude do seu *spin;* para todos os quons elementares, S é um atributo estático. Isso significa, por exemplo, que os elétrons nunca podem aumentar ou diminuir o seu *spin,* i.e., giram eternamente à mesma velocidade. Por outro lado, a orientação do *spin* dos quons elementares pode tomar valores diversos. Para todas as entidades, quânticas e clássicas, a orientação do *spin* é um atributo dinâmico.

Os físicos quase sempre usam o mesmo termo *"spin"* para designar os dois atributos: magnitude e orientação do *spin*. Geralmente, o sentido do texto indica se é ao atributo estático ou ao atributo dinâmico que eles estão se referindo.

A teoria quântica utiliza um único e inusitado modo de representar os atributos dinâmicos. Uma só descrição se aplica a todos. Essa teoria associa a cada atributo dinâmico uma determinada família de formas ondulatórias. Do mesmo modo, cada família concebível de formas ondulatórias corresponde a algum atributo dinâmico. Numa determinada família de formas ondulatórias, cada membro corresponde a um valor físico do atributo adotado pela família. O segredo da eficácia da teoria quântica reside nessa associação entre atributos e formas ondulatórias. Alguns exemplos tornarão mais concreta essa curiosa conexão. O atributo posição está associado à família de formas ondulató-

rias das ondas de impulso. Cada onda de impulso representa um valor da posição. O membro típico dessa família é uma pulsação extremamente alta e infinitamente estreita localizada exatamente na posição x. O valor x da posição, associado a esse membro da família, é a mesma posição x na qual a forma ondulatória está localizada:

$$X = x$$

O atributo quantidade de movimento está associado à família de formas ondulatórias das ondas senoidais no espaço. Cada onda senoidal representa um valor da quantidade de movimento. Um membro típico dessa família se assemelha a uma oscilação infinitamente longa estendendo-se na distância com frequência espacial k. O valor P da quantidade de movimento associado a cada membro da família é dado pela relação:

$$P = hk$$

onde *h é a* constante de ação de Planck.

O atributo energia está associado à família de formas ondulatórias das ondas senoidais no tempo. Cada onda senoidal representa um valor da energia. Um membro típico dessa família é uma nota musical pura vibrando na frequência *f*. O valor *E* da energia associado a cada membro da família é dado pela relação:

$$E = hf$$

onde, mais uma vez, *h é* a constante de Planck.

O atributo *spin* está associado à família de formas ondulatórias dos harmônicos esféricos. Cada harmônico esférico representa um valor diferente para a magnitude do *spin* e para a orientação do *spin.* Um harmônico esférico típico se assemelha a uma bola de gelatina tre-

mente cujas áreas de vibração estão delimitadas por um certo número n de círculos nodais, dos quais m passam nos polos da esfera. A magnitude S do *spin* é determinada pelo número total n de círculos nodais, segundo a regra seguinte:

$$S = hn$$

onde h é a constante de Planck. A orientação do *spin* depende do número m de círculos nodais que passam pelos polos: quanto maior for o número de círculos nodais polares, mais o *spin* apontará na direção polar, que chamaremos de z. Para um determinado harmônico esférico, a orientação S_z do *spin* na direção polar é dada pela relação:

$$S_z = m^2/(n^2+n)$$

Fig. 6.2. Dicionário quântico onda-atributo. Na teoria quântica, cada família de formas ondulatórias corresponde a um atributo físico — um código quântico universal, que constitui a chave para o entendimento

Os números nem representam contagens de círculos nodais e, por isso, os seus valores estão restritos ao conjunto dos números inteiros. Isso significa que tanto a magnitude do *spin,* quanto a sua orientação, admitem somente certos valores descontínuos; diz-se que tais atributos são "quantizados".

A física clássica não impõe limitações para os valores que a quantidade de movimento angular intrínseco *(spin)* de um objeto podem ter: a maçã de Newton podia rodopiar da maneira que quisesse. A teoria quântica, por outro lado, exige que *o spin* e outros atributos especiais sejam quantizados — i.e., podem assumir somente determinados valores. Os atributos quantizados são digitais: podem ser medidos com absoluta precisão — um fato quântico que, de certa forma, vem compensar a imprecisão quântica fundamental exigida pelo princípio da incerteza de Heisenberg.

A conexão atributo-onda, da teoria quântica explica a razão pela qual alguns atributos são quantizados e outros não. Os atributos quantizados correspondem a formas ondulatórias restritas, tais como os harmônicos esféricos, cujas vibrações estão confinadas na superfície de uma esfera.

Uma onda não restrita — onda senoidal e onda de impulso, por exemplo — vibra da maneira que quiser; uma onda restrita vibra somente em determinadas frequências de ressonância. Essa restrição do estado vibratório se traduz numa restrição do número de membros de uma família de formas ondulatórias, o que explica por que nem todos os valores de certos atributos podem ocorrer na natureza.

A associação entre atributos e formas ondulatórias, inerente à teoria quântica, pode ser expressa por um dicionário quântico onda-atributo, que fornece a família de formas ondulatórias correspondente a cada atributo dinâmi-

co. Uma amostra desse dicionário quântico está apresentada na Fig. 6.2. Para cada verbete onda-atributo desse dicionário quântico, há uma regra que nos permite, a partir do nome próprio de uma forma ondulatória, obter a *grandeza do* seu atributo correspondente. Essa regra, de modo geral (mas não sempre), envolve a constante de Planck. Eis aqui uma lista de algumas dessas regras:

NOME DE FAMÍLIA DA FORMA ONDULATÓRIA	NOME PRÓPRIO DA FORMA ONDULATÓRIA	ATRIBUTO DINÂMICO	GRANDE DO ATR BUTO
Impulso	x	Posição	$X = x$
Senoidal espacial	k	Quantidade de movimento	$P = \hbar k$
Senoidal no tempo	f	Energia	$E = \hbar f$
Harmônico esférico	n	Magnitude do *spin*	$S = \hbar n$
Harmônico esférico	n, m	Orientação do *spin*	$S_z \triangleq m^2$ $(n^2 + n$

Reconhecemos nessa lista as fórmulas *P.* = *hk* e *E* = *hf,* que são, respectivamente, a lei de

de Broglie para o comprimento de onda do elétron e a relação Planck-Einstein para a energia de um quantum de luz. A teoria quântica explica essas históricas equações como simples consequências da conexão onda-atributo. Essas duas regras, contudo, são apenas o topo do iceberg quântico. Para cada atributo dinâmico existe uma fórmula que relaciona a grandeza de algum atributo mecânico a uma determinada propriedade ondulatória, i.e., ao nome próprio da forma ondulatória que lhe é correspondente.

A conexão onda-atributo é, sem sombra de dúvida, uma das características mais incomuns da teoria quântica. Parece natural associar uma onda a cada quon, uma vez que os quons apresentam alguns aspectos ondulatórios. Mas como podemos justificar a associação entre formas ondulatórias abstratas e atributos mecânicos? O que, neste mundo, podem ter em comum quantidade de movimento e onda senoidal?

Basicamente, essa associação onda-atributo só se justifica porque funciona. Um realista diria que ela funciona porque reflete alguma correspondência realmente presente no mundo: a natureza, desde o início, associara a quantidade de movimento à onda senoidal; os seres humanos só recentemente teriam descoberto o caráter natural dessa associação. Durante milhares de anos, nossa cultura tem sido moldada pela literatura, pelas liturgias e pelas leis construídas com base na linguagem humana. Em *The Cosmic Code,* Heinz Pageis descreve o empreendimento científico como a abertura do "Grande Livro da Natureza": a descoberta e a decodificação da antiquíssima mensagem não humana que ordena o universo. 0 código cósmico somente ontem foi alcançado pelo nosso discernimento, mas a estranha beleza dessa linguagem alienígena já está reestruturando a cultura humana, conformando-a ao seu padrão próprio.

O setor biológico do código cósmico está redigido pelo código DNA, que associa certos trigramas moleculares a determinados aminoácidos — os blocos de construção da vida na Terra. A chave do setor quântico do código cósmico é um código que associa a cada atributo físico uma determinada forma ondulatória. O código quântico onda-atributo é mais geral do que o DNA: onda senoidal significa quantidade de movimento de um quon em qualquer lugar do universo.

De acordo com a teoria quântica, qualquer forma ondulatória, por mais extravagante que seja, corresponde a algum atributo dinâmico especial, que podemos, em princípio, medir. Existe um número infinito de famílias de formas ondulatórias possíveis, e isso significa que o dicionário onda-atributo contém um número infinito de verbetes.

Por exemplo, a forma ondulatória "piano" está ligada a algum atributo mecânico presen-

temente desconhecido — chamemo-lo de "atributo piano" — que um elétron ou outro quon qualquer irá revelar numa situação de medição pertinente ao piano. Do mesmo modo, podemos testar um elétron para determinar a magnitude do seu "atributo tuba", ou "atributo flauta", ou "atributo órgão Wurlitzer". Os físicos têm mostrado pouco interesse em medir essas obscuras propriedades mecânicas, mas, caso haja necessidade, a teoria quântica poderá prever esses resultados tão facilmente quanto prevê os resultados da medição do *spin* e da quantidade de movimento.

A resposta à nossa segunda questão — Como a teoria quântica descreve um atributo físicoΔ — é a seguinte: a teoria quântica não "descreve" atributos, ela representa-os. Ao invés de lidar diretamente com os atributos mecânicos de um quon, a teoria quântica substitui cada um deles por uma determinada forma ondulatória retirada de um dicionário quântico uni-

versal onda-atributo. Uma vez representados o quon (com sua onda mandatária ψ) e os atributos (formas ondulatórias) que queremos medir, estaremos prontos para efetuar a medição propriamente dita.

Para descrever uma situação de medição, a teoria quântica se apóia no teorema sintetizador, que afirma ser possível decompor uma onda *w* em formas ondulatórias pertencentes a qualquer família de formas ondulatórias. Esse teorema nos permite imaginar um prisma analisador para cada família de formas ondulatórias: um prisma de ondas senoidais, por exemplo. O prisma senoidal funciona do seguinte modo: incide-se a onda *w* no prisma e ele decompõe essa onda num espectro de ondas senoidais resultantes. Os prismas que temos em mente, aqui, são o que poderíamos chamar de "softprismas" (por analogia com *software)* e não objetos físicos. Esses prismas representam a análise matemática de uma onda incidente,

que a transforma em uma soma de formas ondulatórias (receita de vibração) pertencentes a uma determinada família de formas ondulatórias. Seguindo o exemplo de Joseph Fourier, os matemáticos, por mais de um século, vêm desenvolvendo processos cada vez mais engenhosos de partição de uma onda em suas formas ondulatórias componentes. Seus esforços têm sido transformados em programas de computadores, que decompõem, rapidamente, uma onda arbitrária em membros de uma qualquer dentre numerosas famílias de formas ondulatórias comuns. Quando nos referimos a "prisma de ondas senoidais", estamos imaginando um desses programas computacionais decompondo uma onda em uma série única de ondas senoidais que a constituem.

Vamos supor que possuímos uma caixa desses softprismas (programas), um para cada família de formas ondulatórias. Isso é tudo o que necessitamos para descrever uma medição

quântica. Suponhamos, ainda, que decidimos medir o "atributo A" de um elétron, onde *A* pode ser a posição, a quantidade de movimento, ou qualquer outro atributo mecânico, por mais exótico que ele seja. Maxine, a talentosa física teórica, preverá o resultado dessa experiência, utilizando a teoria quântica. Olhemos por cima do ombro de Maxine e observemos como ela usa a teoria quântica para descrever a medição do atributo *A*.

O primeiro passo será determinar a função ondulatória ψ do elétron. Grande parte da formação de um físico consiste em ensiná-lo a construir as funções ondulatórias de quons que se encontram em situações físicas críticas, tais como estarem encerrados em caixas, caídos dentro de poços profundos, ou forçados a passar por orifícios diminutos. Suponhamos que esses ensinamentos tenham produzido o efeito desejado e que Maxine saiba como calcular, para o elétron em questão, o formato de sua onda

quântica mandatária.

O segundo passo consiste em procurar o atributo A no dicionário onda-atributo. Suponhamos que Maxine descubra que o atributo A corresponda à família W de formas ondulatórias. Os membros dessa família se distinguem por uma propriedade ondulatória w que, de maneira única, identifica cada membro. O dicionário fornece, ainda, uma regra que associa a cada propriedade ondulatória w um valor A do atributo A. Essa regra pode ser tão simples quanto a seguinte fórmula:

$$A = hw$$

ou pode, também, ser extremamente complexa. Em todo caso, dada a forma ondulatória $w1$, Maxine conhecerá o valor $A1$ do seu atributo físico associado. Consideremos, para simplificar, que A é um atributo quantizado que assume somente dois valores possíveis A 1 e $A2$. Haverá,

então, somente duas ondas na família *W* de formas ondulatórias, uma denominada *w1* e outra denominada *w2*.

Um atributo que assume apenas dois valores é o tipo mais simples possível de atributo dinâmico. Contudo, a despeito de sua simplicidade, os atributos de dois valores cobrem toda a faixa de comportamentos quânticos e desempenham importante papel na física: a orientação do *spin* de um elétron e o atributo polarização do fóton assumem ambos somente dois valores.

Passo três: Maxine retira da caixa de soft-prismas analisadores o prisma que decompõe as ondas em formas ondulatórias *W*.

Passo quatro: Maxine faz passar a onda mandatária ψ do elétron, no prisma *W* e anota o resultado. O prisma *W* divide a onda mandatária do elétron em duas formas ondulatórias *w1* e *w2*, cada uma com sua própria amplitude e fase. Lembremos que, para todas as ondas quân-

ticas, a intensidade (quadrado da amplitude) representa probabilidade.

O passo cinco consiste em calcular o quadrado da amplitude de cada forma ondulatória para obter as duas possibilidades. Suponhamos que esses números são 0,75 (75%) e 0,25 (25%). Esse passo encerra a descrição quântica do processo de medição. Estamos agora prontos para confrontar as previsões da teoria quântica com os fatos quânticos.

Para comparar a teoria quântica com o fato, precisamos encontrar um meio de medir o atributo *A* nos elétrons em questão. Isso implica em construir, no laboratório, um analisador do atributo *A,* que não constitua um procedimento matemático como os prismas de Maxine, mas seja um objeto realmente material. O analisador de *A* é uma máquina que funciona da seguinte maneira: entra-se com um feixe de quons (representado, cada um, pela mesma função ondulatória) e a máquina divide-o em dois

feixinhos; um de quons que possuem, todos, o valor *A1* de A e outro de quons que possuem o valor *A2* de *A*. Para cada feixinho existe um detector (que pode ser uma tela de fósforo), que conta e registra o número de quons em cada canal. Para se medir qualquer atributo, simplesmente conta-se o número de quons que apresentam cada valor desse atributo.

A teoria quântica, neste caso, prevê que 75% dos elétrons, apresentarão o valor *A1,* e os 25% restantes irão parar no detector de *A2.* Em todos os casos em que probabilidades como essas foram confrontadas com a experiência, os fatos confirmaram a teoria.

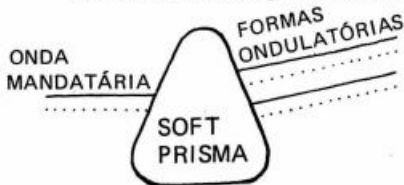
Se estivéssemos tratando de um teste real, com qualquer feixe de quons, com qualquer atributo, nenhum físico apostaria contra a teoria quântica. Em milhões de situações experimentais, em centenas de laboratórios diversos, esse inusitado processo previsivo jamais deixou de acertar no alvo. No laboratório, um físi-

co experimentalista se arma com um feixe real de quons, um classificador real de atributos que separa esses quons em pequenos feixes, cada um com um diferente valor do atributo, e, ainda, detectores que contam o número de quons em cada feixe.

No papel, um físico teórico substitui o feixe de quons por uma onda mandatária fictícia e substitui o classificador de atributos por um softprisma analisador de formas ondulatórias, que decompõe a onda mandatária do quon em um espectro de formas ondulatórias fictícias, que, na teoria quântica, tomam o lugar dos atributos. A intensidade (quadrado da amplitude) de cada forma ondulatória resultante prevê a probabilidade, que o seu atributo correspondente tem, de surgir no espectro experimental do atributo.

A teoria quântica se equipara à medição real dos atributos físicos de um quon através de uma charada matemática da qual fazem parte a

onda mandatária fictícia e as formas ondulatórias que a constituem. Essa representação inteiramente ondulatória se reconcilia com o fato de que todos os eventos quânticos reais são (como o clarão numa tela de fósforo) pertinentes às partículas, quando interpreta essas ondas, não como os eventos propriamente ditos, mas como o padrão formado por esses eventos. Por corresponderem a padrões formados pelas partículas, essas ondas quânticas mandatárias se comportam menos como ondas oceânicas e mais como "ondas de crimes" — o tipo de onda que rege a forma da floresta, e não a localização das árvores individuais.

A. REPRESENTAÇÃO QUÂNTICA

B. MEDIÇÃO REAL

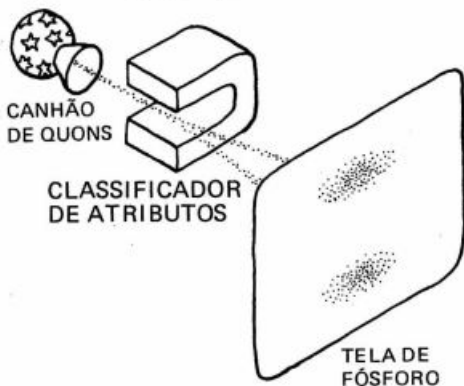



Fig. 6.3. Representação de uma medição quântica. A teoria quântica apresenta a medição física como um softprisma que decompõe uma onda mandatária em suas formas ondulatórias componentes. Esse procedimento conceitual representa uma experiência em que um equipamento de laboratório classifica os quons, distribuindo-os em feixes diferentes, segundo a grandeza de um determinado atributo físico.

Na prática, a teoria quântica não se distingue da teoria clássica em numerosas situações (gravidade quântica, por exemplo) porque os novos efeitos que ela prevê são demasiadamente diminutos para serem medidos. Além disso o escopo, tanto da experimentação quântica quanto da teoria, está limitado pelos recursos experimentais e computacionais da tecnologia atual. Uma dessas limitações técnicas é a dificuldade de se computar as formas ondulatórias que correspondem a certos atributos. Os físicos teóricos podem facilmente calcular a conexão onda-atributo para os atributos de quons elementares, mas esses cálculos se tornam cada vez mais difíceis à medida que os quons se tornam mais complexos. O cálculo dos atributos de moléculas não é fácil; computar a forma ondulatória que corresponde ao atributo cara/coroa de uma moeda está além do alcance da matemática de hoje.

No campo experimental, é fácil medir o atributo cara/coroa de uma moeda, mas, frequentemente, é muito difícil (e caro) construir os classificadores de atributos dos quons elementares que tão displicentemente invocamos no papel. No entanto, os físicos têm sido capazes de projetar esses classificadores para os principais atributos do quon elementar.

O atributo posição pode ser medido com uma tela de fósforo, ou numerosos outros detectores sensíveis à presença nua de um quon. Nossos olhos constituem um classificador para o atributo posição dos fótons.

No caso de partículas com carga, um campo magnético uniforme age como classificador de quantidades de movimento, e, no caso de partículas neutras, um campo magnético não uniforme pode classificar os quons de acordo com a magnitude e orientação do *spin.* Conforme veremos, certos cristais transparentes podem classificar os fótons segundo os seus atributos de

polarização, um atributo da luz estreitamente ligado ao *spin* do fóton.

Alguns classificadores de atributos custam milhões de dólares — por exemplo, a máquina que conta o número de partículas *K* que possuem o atributo relativo à desintegração em dois muons; outros separadores são extremamente simples. A experiência de Airy (Fig. 4.1) encerra um exemplo de classificador de quantidade de movimento formado de nada mais que um pequeno orifício e uma tela de fósforo. Qualquer quon que passe pelo orifício com quantidade de movimento lateral zero atingirá o centro da tela. Quanto mais quantidade de movimento lateral tiver um quon mais ele se desviará de sua rota e mais longe do centro será o seu impacto sobre a tela. O padrão de Airy, além de demonstrara natureza ondulatória do elétron, registra, também, o espectro da quantidade de movimento lateral desses quons elementares.

O PRINCIPIO DA INCERTEZA DE HEISENBERG

A representação dos atributos como formas ondulatórias, na teoria quântica, nos dá uma nova maneira de ver o princípio da incerteza de Heisenberg (PIH). De acordo com o PIH, todo atributo A possui um atributo conjugado *V.* Para qualquer quon, por mais que nos esforcemos, não poderemos reduzir, além de um certo limite natural, o erro recíproco de medida associado a esses dois atributos.

Recordando o Capítulo 5, vemos que para cada família *W* de formas ondulatórias, existe uma família conjugada *M* de formas ondulatórias, cujos membros são os que menos se assemelham às formas ondulatórias da família *W.* Se utilizamos o teorema sintetizador para decompor qualquer onda *w* em formas ondulatórias *W,* obtemos uma determinada faixa espec-

tral ΔW; se decompomos a mesma onda w em formas ondulatórias M, obtemos uma outra faixa espectral ΔM. O código de área espectral exige que:

$$\Delta W. \Delta M > 1$$

O princípio da incerteza de Heisenberg provém diretamente desse código de área espectral, porque os atributos conjugados, da teoria quântica, correspondem exatamente às famílias conjugadas de formas ondulatórias, através da conexão quântica onda-atributo. Assim, um feixe de quons, para o qual uma medição de atributo A fornece um estreito espectro de atributo (ΔA pequeno), dará necessariamente um largo espectro de atributo na medição do seu atributo conjugado V (ΔV grande). O princípio da incerteza de Heisenberg se deriva somente dessa conexão onda-atributo, e nada tem a ver com a "inevitável perturbação do sistema cau-

sada pela medição". Em virtude de sua natureza ondulatória, os quons simplesmente possuem uma "incerteza" inata, que torna fisicamente impossíveis as medições de dupla precisão.

Tanto Heisenberg quanto Bohr alertaram contra a interpretação do PIH em termos de uma perturbação causada pela medição. Ao contrário, eles afirmaram que essa relação marcava o limite além do qual as noções clássicas pertinentes aos atributos não mais poderiam ser impostas. Pode-se falar, de modo clássico, a respeito da posição e da quantidade de movimento desde que não haja necessidade de se determinar o valor desses atributos com muita precisão. No entanto, quando imaginamos atributos conjugados definidos com uma precisão maior do que a permitida pelo PIH, estaremos pensando em algo que não pode existir na natureza, como um círculo quadrado.

Do ponto de vista de seres humanos que tentam desvendar, tanto quanto possível, a na-

tureza, a necessária largura das faixas espectrais recíprocas dos atributos conjugados aparece como uma limitação imposta à medição: Por isso, os seres humanos se referem a esse fenômeno como um "princípio da incerteza". Contudo, do ponto de vista do quon, o código de área espectral representa uma garantia, da própria natureza, de que os seus "domínios de possibilidades" nunca serão reduzidos além de um certo ponto. Se reduzimos o domínio de possibilidades de posição de um quon, automaticamente estendemos o domínio de possibilidades de sua quantidade de movimento. Essa característica natural das ondas — a impossibilidade de serem espectralmente comprimidas em duas dimensões conjugadas — é um privilégio dos quons, que lhes assegura, a cada um, um domínio próprio de possibilidades para sempre irredutível. O PHI, visto sob o aspecto da vantagem para o quon, pode ser denominado "lei do domínio": não se reduzirá o domínio total de

possibilidades de um quon abaixo de um certo limite. A lei do domínio não constitui uma imposição arbitrária. Ao contrário, ela é uma consequência matemática rigorosa da própria natureza ondulatória.

Vistas de fora — do ponto de vista humano — essas relações conjugadas obrigatórias se assemelham a "incertezas". Vistas de dentro — do ponto de vista do quon — elas lembram os "domínios de possibilidades", o território básico inalienável de cada quon no universo.

O PRINCÍPIO DE HEISENBERG PARA ATRIBUTOS DE DOIS VALORES

O princípio da incerteza de Heisenberg (também conhecido como lei do domínio) rege todos os atributos dinâmicos, inclusive os atributos quantizados que possuem, para uma medida isolada, a possibilidade de precisão digital absoluta. É instrutivo saber como esses dois efei-

tos quânticos, igualmente fundamentais, coexistem — a absoluta precisão dos atributos quantizados e a obrigatória incerteza recíproca dos atributos conjugados.

São particularmente importantes, para a nossa finalidade, os atributos quantizados que possuem apenas dois valores. Os atributos de dois valores são, dentre os atributos dinâmicos, os mais simples, embora sejam suficientemente complicados para produzir toda uma faixa de efeitos quânticos.

O PIH para atributos de dois valores assume uma forma especialmente simples. Se determinamos, com precisão, o valor do atributo *A* (será *A1,* com certeza, e não A2), o seu atributo conjugado V assumirá necessariamente a incerteza máxima. Até onde um atributo de dois valores poderá tornar-se incerto? Para um atributo de apenas dois valores a "incerteza máxima" implicará uma mistura meio-a-meio de V1 e V2, de ocorrência aleatória, semelhante â

ocorrência de cara ou coroa para uma moeda sem imperfeições. Se preferirmos medir o atributo V com exatidão, o seu atributo conjugado A apresentará uma mistura aleatória de resultados meio-a-meio. Esse comportamento se aplica, na teoria quântica, a todos os atributos de dois valores.

Por serem A e V quantizados, cada medição individual será perfeitamente exata (Al ou A2, por exemplo). O conceito de "incerteza" não se aplica a uma medição individual, mas à medição de um conjunto de quons. Juntamente com essas medições individuais perfeitas, o PIH afirma que, nem a natureza, nem algum experimentador engenhoso, jamais conseguirão produzir um feixe de quons que sempre produza Al quando o atributo A for medido ($\Delta A = 0$), ou sempre produza V1 quando o atributo V for medido ($\Delta V = 0$).

A teoria quântica representa cada quon através de uma onda mandatária, e seus atribu-

tos mecânicos através de formas ondulatórias específicas. A proporção, em relação à família das ondas atributos, com que a forma ondulatória de um atributo aparece na análise da função ondulatória representa a probabilidade de se obter aquele valor na medição do atributo. Essa teoria lida com o mundo de uma maneira particularmente indireta. Ela focaliza estritamente os atos de medição, e não o modo pelo qual o mundo pode se comportar no intervalo entre as medições; ela não descreve resultados isolados de medições, mas somente padrões de resultados, dos quais fornece meramente previsões estatísticas.

Os pesquisadores da realidade querem mais do que isso. Eles querem saber o que é feito dos eventos isolados (que completam o mundo) durante as medições e nos intervalos entre estas. A teoria quântica prevê os fatos com exatidão, mas nos deixa no escuro naquilo que concerne a essa outra espécie de realidade. Einstein

expressou esse desejo de olhar além dos fatos quando disse: "Ainda acredito na possibilidade de um modelo, isto é, de uma teoria, que represente as coisas em si e não meramente a probabilidade de sua ocorrência."

No próximo capítulo, examinaremos algumas das tentativas de, indo além da teoria quântica, chegarmos às coisas em si.

7. Descrevendo o Indescritível: A Questão da Interpretação Quântica

> Elas não são unidades lisas na superfície, retangulares ou envoltas em anéis de carbono, que se encaixam umas nas outras como tijolos. Cada molécula é um polvo celestial com milhões de tentáculos flutuantes, cobertos de joias, ávidos de fusão.
> Timothy Leary

Os fatos quânticos, tais como a experiência da difração num orifício, indicam que cada elétron, nos intervalos entre as observações, atua como uma onda, mas se comporta como uma partícula, sempre que está sendo observado. A teoria quântica — a matemática que descreve esses fatos — reflete, similarmente, a dupla identidade de cada quon, representando a entidade não me-

dida como uma onda de configuração especial — cuja forma codifica a probabilidade de que um evento pertinente à partícula, com localização e atributos definidos, seja observado. Tanto a teoria quântica quanto o fato quântico sustentam a noção de que a situação real de um elétron (ou qualquer outro quon) é radical mente diferente do status de realidade de qualquer elétron que alguém já tenha medido.

Alguns físicos gostariam de considerar como causa do dilema quântico a inevitável perturbação provocada pelo observador naquilo que ele observa. Porém, se encaramos seriamente a teoria quântica como um retrato do que está realmente acontecendo, cada ato de medição faz mais do que apenas perturbar; a medição altera profundamente a própria construção da realidade.

Podemos imaginar, como exemplo de uma medição perturbadora, a tentativa de localizar com precisão uma vespa que se move veloz-

mente e que procura escapar das garras do nosso calibrador: o mundo quântico — delicado e dinâmico — é excessivamente agitado para que possamos imobilizá-lo com nossos toscos instrumentos.

Exemplos simples de perturbação, como esse, não fazem justiça à descrição quântica. A teoria quântica indica que, anteriormente ao ato da medição, a partícula (vespa) não era absolutamente uma partícula, mas algo tão grande quanto uma baleia (onda). Chamando o quon medido de vespa e o quon não medido de baleia ainda estaremos perdendo a essência de uma medição quântica, porque a vespa e a baleia são, ambos, animais. Na descrição quântica, um quon não medido não goza do mesmo estilo de existência do quon medido, um quon não medido reside em um mais atenuado estado de realidade do que os quons que aparecem em nossas telas de fósforo.

Imaginemos que a baleia não viva no mun-

do real, mas no plano dos espíritos; a vespa é real. Estamos agora mais próximos do sentido da descrição quântica. Sempre que ocorre uma medição, em qualquer lugar do mundo, algo como uma fantasmagórica baleia (imensa, etérea, permeável e com as características de uma onda) se transforma em algo parecido com uma vespa real (diminuta, sólida e com as características de uma partícula). A medição quântica lembra mais um bom espetáculo de mágica do que a prosaica leitura de um instrumento de medida.

Nos termos da analogia com a vespa e a baleia, a questão da realidade quântica se divide em duas partes: 1. qual é a natureza da baleia? 2. como a baleia se transforma numa vespa? A busca de uma descrição da baleia é denominada "questão da interpretação quântica". Essa besta misteriosa — o quon em seu estado selvagem, não medido — é representada por uma função ondulatória. A questão da interpretação indaga:

o que nos diz a onda mandatária do quon a respeito da situação factual de um quon não medido?

A questão do modo pelo qual a baleia se transforma em vespa é denominada "problema da medição quântica": o que nos diz a representação quântica de uma medição — um soft-prisma dividindo uma onda mandatária em formas ondulatórias — a respeito do que realmente ocorre no ato de medir?

Discutirei o problema da medição quântica no próximo capítulo, e considerarei, aqui, a questão da interpretação quântica. Qual é a natureza do quon não medido? Podemos descrever com palavras as baleias invisíveis deste mundo, ou devemos nos manter em silêncio? No intervalo entre as observações, um quon é representado por sua onda mandatária; a função ondulatória é a melhor pista que possuímos concernente à real natureza do universo não medido.

O maior problema de um físico teórico, quando lida com uma nova entidade quântica, é o de saber como construir a sua função ondulatória. De um modo geral, ele apelará para a resolução de algum tipo de equação ondulatória, como a equação de Schrödinger para os quons lentos, ou a de Dirac para os que se movem com velocidades próximas à da luz.

A VERSÃO DA ADIÇÃO DE HISTÓRIAS, DE FEYNMAN, PARA A TEORIA QUÂNTICA

Em 1948, Richard Feynman, então em Cornell, criou uma maneira inusitada de calcular a função ondulatória de um quon, logo reconhecida como o quarto caminho quântico teórico, comparável à mecânica matricial de Heisenberg, à mecânica ondulatória de Schrödinger e à teoria da transformação de Dirac. O método de Feynman, denominado abordagem da adição de histórias, é útil, não só para os cálculos das fun-

ções ondulatórias, como para o discernimento do possível significado dessas funções.

Feynman inspirou-se no trabalho de Christian Huygens, um físico holandês do século XVII que inventara um novo modo de analisar as ondas luminosas, decompondo-as em simples somas de pequenas ondas esféricas. No século XX, Richard Feynman adaptou a técnica de Huygens às ondas quânticas, decompondo-as em simples somas de "histórias elementares". Como uma ilustração do seu método, vejamos como Feynman pensaria em construir a onda quântica da experiência da difração em um orifício (padrão de Airy). A Fig. 7.1 mostra o conhecido canhão de quons disparando elétrons contra uma tela de fósforo através de um orifício circular. Para calcular a onda mandatária ψ do elétron, Feynman assume que a amplitude de onda na tela é igual à soma das amplitudes de todos os caminhos possíveis que um elétron pode percorrer para se deslocar do canhão

até à tela. E mais: todas as trajetórias são igualmente importantes, nenhuma delas sendo melhor do que as outras. Feynman reforça essa democracia quântica do seu esquema, atribuindo a mesma amplitude a todas as trajetórias. Cada caminho difere dos outros somente pela fase. A fase da trajetória, em qualquer local, depende de sua história: o itinerário percorrido até ali.

Feynman assume que o mundo não medido funciona segundo duas regras:

1. Um quon isolado percorre todas as trajetórias possíveis.
2. Nenhuma trajetória é melhor do que outra.

Essas regras não significam que um elétron não medido esteja livre para seguir o caminho que quiser. O elétron não tem escolha: segundo as regras de Feynman, o elétron está fadado a tomar todos os caminhos simultaneamente.

Além disso, a democracia quântica das possibilidades proíbe o elétron de "forçar o passo" em uma trajetória e "saltitar alegremente" em outras. Embora comumente encontremos os elétrons nas proximidades de sua trajetória clássica, esta não é, no esquema de Feynman, mais especial do que um caminho "selvagem", seguindo em loucos ziguezagues na direção da tela.

A ideia de Feynman de chegar às probabilidades adicionando os caminhos possíveis tem muito em comum com o raciocínio estatístico clássico. Os jogadores, por exemplo, calculam a vantagem nos dados contando o número de "caminhos dos dados" que os levam a totalizar sete. Quanto mais caminhos houver, mais provável será o resultado.

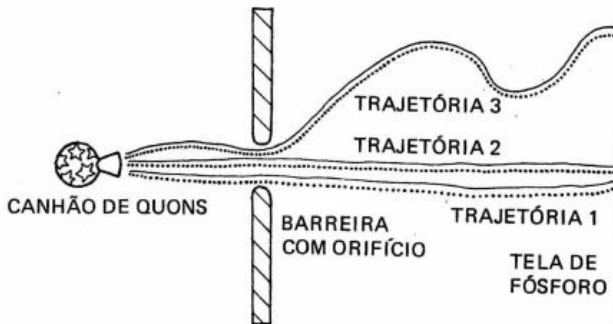



Fig. 7.1. Abordagem da adição de histórias, de Feynman, da te ria quântica. No esquema de Feynman, um quon age como se s guisse, simultaneamente, todas as trajetórias. Essas trajetória diferentemente das trajetórias clássicas, possuem fases que se s mam, à maneira das ondas, para formarem a onda mandatária c sistema — a representação do padrão de probabilidade de u grande número de quons previamente igualados num mesm estado.

Os elétrons são mais excêntricos do que os dados porque: 1. um elétron isolado segue todos os caminhos — um dado isolado segue apenas um; 2. os elétrons possuem fase e os dados não. Se os dados (não observados) se-

guissem todos os caminhos e possuíssem fases, poder-se-ia imaginar uma situação em que se obteria os seis atirando os dados um a um, mas nunca se poderia obter uma dupla de seis porque os seis teriam fases opostas e se cancelariam mutuamente.

Mas se o elétron se esparrama no espaço, indo para todos os lados ao mesmo tempo, por que, no tubo de imagem da TV, ele parece deslocar-se em linha reta? A Fig. 7.1 mostra três trajetórias de Feynman para um elétron, duas mais ou menos retas, próximas da trajetória clássica, e uma terceira "selvagem".

No processo de adição das trajetórias, Feynman descobriu que, ao lado de cada trajetória selvagem existe uma trajetória que lhe é paralela, de fase exatamente oposta. Como duas ondas de igual amplitude e fases opostas se cancelam totalmente, a interferência destrutiva elimina todas as trajetórias selvagens. Somente nas vizinhanças da trajetória clássica do elé-

tron — nesse caso a *linha reta que* passa pelo canhão de elétrons, pelo orifício e pelo centro da tela — algumas trajetórias sobrevivem. A amplitude da função ondulatória é maior nas vizinhanças da trajetória clássica porque, ali, as trajetórias se somam em fase. Ironicamente, o fato de que o elétron possui fase — uma propriedade tipicamente quântica — é o que salva o dia dos físicos clássicos; sé as trajetórias do elétron não pudessem "interferir", o elétron estaria zumbindo velozmente por toda parte.

O método de Feynman funciona: a adição de todas as trajetórias dá a mesma função ondulatória obtida através da resolução da equação de Schrödinger. Na experiência da difração em um orifício, a abordagem da adição de histórias produz o conhecido padrão de Airy, centrado na clássica trajetória retilínea do elétron.

A descoberta de Feynman de que podia construir a função ondulatória de um quon somando as suas trajetórias possíveis, nos dá uma

visão da natureza da função ondulatória melhor do que a fornecida pela simples resolução de uma equação. A abordagem da adição de histórias indica que a onda mandatária quântica representa a totalidade das possibilidades — considerada a reciprocidade das fases — abertas a uma entidade quântica. A denominação "onda de possibilidade" que demos à função ondulatória, bem como a expressão "domínio de possibilidade" para designar a "incerteza" de um quon, foram inspiradas pela pitoresca abordagem da teoria quântica, criada por Richard Feynman.

A ONTOLOGIA ORTODOXA

A especulação em torno do que realmente acontece no mundo no intervalo entre as medições contraria o modelo que prevalece na física. A maioria dos físicos utiliza a teoria quântica como um instrumento para o cálculo dos re-

sultados e "deixa para os filósofos" o encargo de imaginar o que realmente está acontecendo atrás da matemática. Embora os físicos oficialmente aleguem ignorar o status ontológico dos quons não medidos, eles de fato aderem a uma linha de pensamento não oficial que chamamos de ontologia ortodoxa. A maioria dos físicos aceita essa ontologia sem discuti- la; apenas alguns transviados a rejeitam.

A ontologia ortodoxa baseia-se num simples postulado concernente à real situação física de um quon não medido. Esse postulado não pode ser experimentalmente verificado, nem pode ser logicamente deduzido. É difícil identificar a origem desse postulado e só podemos dizer que ele reflete os sentimentos intuitivos da maioria dos físicos sobre o modo pelo qual o mundo quântico de fato funciona; é uma consolidação do modo de sentir a própria natureza das coisas, adquirido em anos de contato com os detalhes da teoria quântica e com a maneira

pela qual ela é aplicada na prática. Esse postulado pode não corresponder, de nenhum modo, à realidade subjacente, mas, se isso acontecer, a maioria dos físicos terá que mudar de atitude.

O postulado central da ontologia ortodoxa é o seguinte: Todos os quons representados pela mesma onda mandatária são fisicamente idênticos. Diz-se que dois quons estão "no mesmo estado" quando eles são representados pela mesma onda mandatária. Em termos de estado quântico, o postulado diz: "Todos os quons no mesmo estado são exatamente iguais".

Por exemplo, cada elétron que passa pelo orifício da experiência de Airy é descrito pela mesma onda mandatária: todos os elétrons de Airy estão no mesmo estado quântico. De acordo com a ontologia ortodoxa, a situação física de cada um desses elétrons, antes de serem medidos, é exatamente a mesma: não há qualquer diferença entre os elétrons # 123 e # 137.

Os físicos utilizam a função ondulatória pa-

ra calcular a probabilidade de que certos valores de um atributo surjam na medição. Por lidar com a probabilidade, a função ondulatória — como a chance no jogo de ciados — possui um significado estatístico evidente, relevante para o estudo do comportamento de um grande número de quons. Porém, em razão do postulado ortodoxo da identidade, a função ondulatória descreve, do mesmo modo, um quon isolado. Se todos os quons são fisicamente idênticos, a distinção entre descrição estatística e descrição individual desaparece.

Na experiência de Airy, os elétrons não atingem, todos, a mesma molécula de fósforo, mas atingem, na verdade, diferentes pontos da tela. Se os elétrons são de fato todos iguais, por que se comportam de maneiras diferentes? A ontologia ortodoxa explica o fato de que os elétrons são idênticos *no modo de ser,* mas diferente *no comportamento,* em razão do caráter aleatório das grandezas quânticas. A essên-

cia dessa característica quântica se traduz simplesmente do seguinte modo: situações físicas idênticas dão origem a resultados diferentes.

Uma vez atingido o nível do caráter aleatório quântico, nenhuma explicação adicional é possível. Não se pode ir mais fundo porque a física pára ali. Albert Einstein, que não admirava a ontologia ortodoxa, opôs-se a essa ausência de leis no coração da natureza dizendo que não podia acreditar que Deus jogasse dados com o universo. Essa nova forma de indeterminismo final pode ser chamada de "ignorância quântica": não sabemos porque um elétron atinge uma determinada molécula de fósforo porque não há nada ali para se saber. Por outro lado, quando os dados caem do copo, a imprevisibilidade do resultado decorre da "ignorância clássica" — o fato de que o nosso conhecimento da real situação dos dados é inevitavelmente parcial.

Porque acreditam na ontologia ortodoxa,

Bohr e Heisenberg podem afirmar que, a despeito do seu caráter estatístico, a teoria quântica fornece um relato completo dos fatos. Os críticos que alegam ser essa teoria incapaz de explicar os diferentes comportamentos observáveis dos elétrons no mesmo estado não estão considerando o caráter aleatório quântico: situações idênticas dão resultados diferentes. E isso é tudo. Se a ontologia ortodoxa constitui uma visão fiel das coisas, não há absolutamente nada na situação física do elétron não medido que nos diga onde ele vai atingir a tela. Exigir que a teoria quântica nos dê essa informação, ou julgá-la "incompleta", é pedir o impossível. A teoria quântica fornece a mais completa descrição da situação do elétron compatível com a real natureza deste. Acrescentar alguma coisa seria, como dizem os chineses, "pôr penas em cobras".

Assim, quando vemos um clarão na experiência de Airy, não devemos imaginar que, ime-

diatamente antes do evento, um pequenino elétron estava se dirigindo para uma determinada molécula de fósforo. De acordo com a ontologia ortodoxa, anteriormente à ocorrência de uma medição todas as possibilidades de um elétron não medido são possibilidades vivas: imediatamente antes de atingir a tela, o elétron não está se deslocando numa direção especial. Caso precisemos realmente falar sobre isso, diremos que, imediatamente antes do impacto, o elétron estava se deslocando em todas as direções ao mesmo tempo. A lei da entrada dos elétrons não medidos é a seguinte: um quon isolado segue todas as trajetórias.

Resumindo a ontologia ortodoxa:

1. Todos os quons no mesmo estado quântico são idênticos.
2. A função ondulatória fornece um relato completo da situação física de um quon isolado.

3. A situação do experimentador em relação a um quon não medido é de ignorância quântica: o conhecimento que falta simplesmente não está ali para ser conhecido.
4. Um quon não medido isolado segue todas as trajetórias que lhe estão abertas.
5. As diferenças detectadas entre quons não medidos idênticos derivam do caráter aleatório quântico.

Embora a maioria dos físicos aceite a ontologia ortodoxa, uma pequena porém prestigiada minoria acredita que o mundo funciona segundo outras linhas. Entre os ilustres dissidentes da doutrina da identidade quântica encontram-se Albert Einstein, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, David Bohm e John Stewart Bell, bem como outros menos notórios. Esses físicos propõem várias alternativas para a realidade ortodoxa, mas a maioria das propostas implica na explicação do mundo em termos de conhecidos

conceitos clássicos; uma realidade quântica a que demos o nome de neorrealismo.

Os opositores da ontologia ortodoxa negam o primeiro postulado desta e chegam ao fim com outra visão, diametralmente oposta, da realidade não medida:

1. Os quons no mesmo estado são fisicamente diferentes.
2. A função ondulatória fornece uma descrição estatística de um conjunto de quons, e uma descrição necessariamente incompleta de um quon isolado.
3. A situação do experimentador em relação a um quon não medido é de ignorância clássica: certas variáveis que a teoria quântica omite estão ocultas.
4. Um quon isolado não medido segue uma só (geralmente imprevisível) trajetória.
5. Os quons no mesmo estado apresentam diferenças mensuráveis porque eram fisica-

mente diferentes antes da medição.

Por acreditarem que o caráter aleatório quântico provém, não da total ausência de leis, mas de causas ocultas, esses hereges em relação à visão ortodoxa são às vezes denominados físicos da "variável oculta". O seu objetivo é "completar" a teoria quântica, construindo uma teoria mais profunda que inclua uma explicação, não só para o caráter aleatório daquela, mas, também, para o que realmente acontece numa medição.

Num modelo de variável oculta típico, o mundo é descrito da mesma maneira, quer esteja ou não sendo observado. O elétron, em particular, é sempre uma partícula, exatamente como parece ser quando o observamos. Mas o movimento do elétron é controlado por um campo de forças invisível — a chamada onda piloto — cujas propriedades são ajustadas para reproduzirem os fatos experimentais. Nesse

modelo da realidade, o mundo é feito de partículas e ondas, e não de uma só substância que apresente os dois aspectos.

Os modelos de variável oculta foram originalmente criados para "completarem” a teoria quântica, dando conta dos seus, até então inexplicáveis, resultados aleatórios. Como vantagem filosófica, esses modelos descrevem a realidade sem santificar o ato de medir, recuperando para a física um revigorante senso de objetividade. Nessa versão da realidade, as medições constituem interações comuns, em nada diferentes das outras interações da natureza. As realidades de variável oculta são, também, inteiramente figuráveis em termos clássicos: não existem, por exemplo, fantasmagóricas baleias brancas nadando por aí, nos intervalos entre as medições. Os modelos de variável oculta são atraentes em termos de filosofia, mas possuem um sério empecilho que diminui o seu valor aos olhos de muitos físicos.

Na visão ortodoxa, o mundo é representado por uma onda mandatária fictícia sem quaisquer pretensões de se tornar real. Pelo contrário, nos modelos de variável oculta, a onda que diz ao elétron como ele deve se mover é considerada tão real quanto às águas do oceano Pacífico ou o campo que envolve uma barra magnetizada. Para satisfazer aos fatos quânticos, essa onda real deverá possuir algumas propriedades notáveis; principalmente, ela precisaria estar em conexão com todas as partículas do universo, ser totalmente invisível e se deslocar mais rapidamente do que a luz.

A gravidade está, do mesmo modo, em conexão com todas as partículas do universo. Os físicos não estão particularmente preocupados com esse aspecto da onda piloto. O fato de que a onda piloto é, em princípio, inobservável (pode-se apenas inferira sua presença através dos seus efeitos sobre o elétron) perturba os físicos devido ao alto valor que eles conferem

à observação. Contudo, o fato de que o quark pode, também, em princípio, ser inobservável (na maioria dos modelos de partículas elementares, um quark se combina tão fortemente com outros quarks que não se pode jamais isolá-lo) não diminui o entusiasmo dos físicos por essas entidades hipotéticas. Uma objeção mais séria do que a invisibilidade é o fato de que, nesses modelos de variável oculta, a onda piloto do elétron se desloca rotineiramente com velocidade maior que a da luz.

Muitos físicos simplesmente se recusam a imaginar que cada elétron no mundo é dirigido por uma onda invisível mais rápida que a luz. O teorema de Bell mostra que todos os esforços no sentido de eliminar esse caráter de superioridade em relação à velocidade da luz, pertinente à onda piloto, estão fadados ao fracasso. Bell prova (entre outras coisas) que é impossível construir um modelo de variável oculta que explique os fatos sem incluir algo que se deslo-

que mais depressa que a luz.

Reconhecemos, por ora, o ponto de vista neorrealista, mas continuaremos explorando outras visões da realidade, compatíveis com a ontologia ortodoxa.

QUE TIPO DE REALIDADE SE OCULTA POR TRÁS DA FUNÇÃO ONDULATÓRIA?

A questão da interpretação quântica diz respeito à natureza da realidade não medida: qual é a relação entre a realidade e sua representação, a fictícia onda mandatária ψ?

Examinemos algumas ondas mandatárias de sistemas quânticos simples e indaguemos o que realmente está acontecendo no mundo que elas representam. Assumimos, em concordância com a ontologia ortodoxa que, além do seu significado estatístico, a onda mandatária fornece um relato completo de um quon isolado (não medido). Quando olhamos uma dessas

funções ondulatórias, vemos uma imagem (mais precisamente uma representação) de um elétron, e não de um agrupamento de elétrons. Examinemos algumas funções ondulatórias representativas de um dos mais simples sistemas da natureza; o átomo de hidrogênio, que consiste de um só elétron captado pelo campo de elétrons de um próton. A Fig. 7.2 mostra as funções ondulatórias do hidrogênio em seu estado de terra e em três de seus estados de excitação. Do mesmo modo que o fósforo, o hidrogênio pode ser excitado a partir do seu estado de terra (H) até vários estados de excitação de alta energia (H_1*, H_2*, H_3*). Esses estados de excitação duram alguns bilionésimos de segundo, um tempo relativamente longo na escala atômica. (A luz percorre cerca de 30 centímetros num bilionésimo de segundo, uma distância maior que um bilhão de átomos). Num momento imprevisível, um estado de excitação especial provoca a emissão de um fóton de luz

e o átomo volta instantaneamente ao seu estado de terra. Segundo a ontologia ortodoxa, o fato de que diferentes elétrons no mesmo estado de excitação possuem diferentes tempos de vida não é devido a diferenças ocultas, e sim ao caráter aleatório quântico. Todos os átomos de hidrogênio do universo são exatamente iguais, embora cada um se comporte de maneira diferente.

A igualdade de todos os átomos que possuem uma função ondulatória comum influencia o modo pelo qual o nosso mundo funciona. O físico Victor Weisskopf, do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, aponta uma importante consequência biológica dessa igualdade dos átomos:

"Não existem dois sistemas clássicos realmente idênticos. Contudo, na teoria quântica faz sentido dizer que dois átomos de ferro são 'exatamente' iguais porque as órbitas são quantizadas. Assim, um átomo de ferro aqui e um

átomo de ferro na Rússia Soviética são exatamente iguais. Os nossos caracteres hereditários nada mais são do que os estados quânticos de partes do DNA. De certo modo, a repetição, a cada primavera, do nascimento de uma flor com uma determinada forma é uma expressão indireta da identidade e unicidade das órbitas quânticas."

Examinemos primeiramente o estado de terra H do hidrogênio, cuja função ondulatória eletrônica assume a forma de uma esfera (Fig. 7.2). O diâmetro da esfera dá a medida do domínio de possibilidade espacial do elétron (também chamado de sua "incerteza”), uma grandeza a que já demos o símbolo ΔX. A extensão do domínio de possibilidade de posição do elétron é a própria extensão do átomo, que, neste caso, é de aproximadamente 8 bohrs (1 bohr é aproximadamente igual a 5 bilionésimos do centímetro). O núcleo central, onde se concentram 99,9% da massa do átomo é aproxima-

damente 200.000 vezes menor. Se o núcleo tivesse o tamanho do nosso sol, o estado de terra do hidrogênio seria vinte vezes maior do que o sistema solar!

Se o elétron fosse, realmente, uma partícula pontual sempre em movimento no seu domínio espacial, ele estaria residindo *em* um espaço tão vazio que, por comparação, o sistema solar pareceria superlotado. Considerando que o significado da função ondulatória é, ainda, controverso, não sabemos realmente o que o elétron faz em seu domínio espacial, mas se ele, de fato, se move continuamente, como um pequeno asteroide, com certeza não precisará se preocupar com eventuais encontrões.

ONDAS MANDATÁRIAS DO HIDROGÊNIO

Considerando-se o elétron como uma partícula, o átomo de hidrogênio será, quase todo,

nada mais do que espaço vazio. Mas se o considerarmos como uma onda (domínio de possibilidades), o elétron preencherá o seu átomo de ponta a ponta.

É difícil acreditar que o elétron esteja fisicamente esparramado em todo o seu domínio de possibilidades posicionais, porque sempre que o medimos, nunca vemos um elétron esparramado, mas sempre uma partícula pontual. Em cada átomo, contudo, algo parece se esparramar, enchendo todo o átomo, algo indescritível que denominamos "nuvem de probabilidade", "domínio de possibilidades posicionais", "função ondulatória do elétron", ou "substância quântica", sem que realmente saibamos do que estamos falando. No entanto, seja o que for, o mundo inteiro é feito disso.

ONDAS MANDATÁRIAS DO HIDROGÊNIO

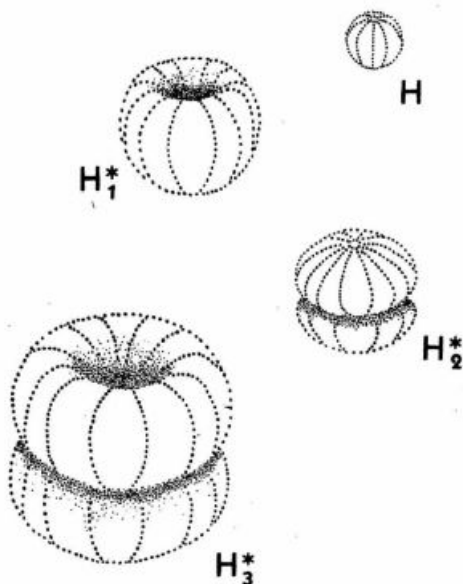



Fig. 7.2. Ondas mandatárias de alguns estados do átomo de hidrogênio: o estado de terra (H); o primeiro estado de excitação (H_1 *); o segundo estado de excitação (H_2 *); o terceiro estado de excitação (H_3 *). Além de representar o padrão de probabilidade do atributo posição de um grande número de átomos de hidrogênio, cada uma dessas formas

Seria tentador descartar a onda de possibilidade de um elétron isolado, como se ela fosse uma ficção estatística abstrata, sem mais realidade do que as chances de um lance isolado no jogo de dados. Mas essas ondas de possibilidade têm consequências mais tangíveis que a sorte nos dados. Tentemos, por exemplo, fazer a nossa mão atravessar a parede mais próxima. Os átomos são quase que só espaço vazio, e os seus elétrons são pequenos demais para nos fazer parar. Somente as ondas de possibilidade de cada átomo reagem contra nós. Bastante concretas, não são?

A despeito de sua representação como "simples possibilidades", os átomos não ficam vagando, uns por dentro dos outros, como neblina, mas se amontoam, mais como bolas de bilhar, cada um pressionando a nuvem de probabilidade do seu vizinho. Seja qual for a verdadeira natureza da onda & de um sistema in-

dividual, ela é, evidentemente, algo suficientemente sólido para suportar o nosso peso.

A função ondulatória *H* do estado de terra do hidrogênio é esférica. O estado de excitação H_1* se parece com uma abóbora- moranga; H_2* lembra um par de agasalhos para as orelhas. O Estado de excitação H_3* se parece com uma rosca em cima de outra.

Talvez possamos imaginar que o elétron é um inseto agitadíssimo, que atravessa o seu domínio espacial tão velozmente que parece estar simultaneamente em todos os lugares. Nesse caso, a onda mandatária do elétron seria uma espécie de fotografia de longa exposição, indistinta, do verdadeiro movimento do elétron. Reconhecemos que esta suposição é uma simples interpretação neorrealista (de variável oculta) da função ondulatória. A variável oculta, nesse caso, é a posição definida porém constantemente alterada do elétron. Nessa interpretação conjetural, os átomos de hidrogênio não são to-

dos sempre iguais, mas diferem no que se refere à posição momentânea dos seus elétrons.

Uma dificuldade óbvia desse modelo de variável oculta reside em que algumas ondas mandatárias — H_3*, por exemplo — consistem de duas partes separadas. Para o estado de excitação H_3*, a probabilidade de que o elétron seja visto na rosca superior é 1/2; na inferior, 1/2 também. Mas a probabilidade de que o elétron seja encontrado em qualquer ponto do plano que separa as duas roscas é exatamente zero. Esse hipotético elétron-inseto deverá passar a metade do seu tempo em cada rosca, mas nunca poderá ser surpreendido entre elas.

Alguns imaginam que os paradoxos quânticos resultam da disparidade entre os tamanhos do mundo quântico e o tamanho do mundo humano: nosso mundo grande funciona de uma maneira; o mundo liliputiano do átomo funciona segundo outras regras. O físico russo-ame rica no George Gamow, em seu divertido livro

Mr. Tompkins Explores the Atom, inventou um mundo em que a constante de Planck, que estabelece a escala dos fenômenos quânticos, é tão grande que os efeitos quânticos são lugar-comum na vida cotidiana. Por exemplo, no fabuloso mundo de Gamow, o Sr. Tompkins observa um jogo de bilhar em que a bola impelida pelo taco ricocheteia na bola alvo, recuando *em todas as direções simultaneamente.* Como Max, o nosso imaginário físico experimental, também o Sr. Tompkins observa, em primeira mão, a democracia de possibilidades do mundo quântico: ele vê, de fato, um único quon seguindo todas as trajetórias possíveis.

Suponhamos que nos fosse possível reduzir às dimensões nucleares o nosso tamanho, e os de nossos aparelhos, e penetrar na função ondulatória H_3* do hidrogênio, como uma espaçonave explorando um sistema solar desconhecido. Pairando no interior da rosca superior daquele estado de excitação, instalamos o nosso

detector de elétrons — a costumeira tela de fósforo — feito da mesma matéria condensada (retirada, talvez, de uma estrela de nêutrons) de que é feita a nossa espaçonave. (Teremos de fazer às pressas as nossas medições; esse estado possui um tempo médio de vida de apenas seis bilionésimos de segundo). Poderíamos solucionar o mistério referente àquilo que a função ondulatória realmente representa, caso fôssemos suficientemente pequenos para entrar na onda mandatária de um elétron?

O que veríamos lá dentro? Nada especial, creio. O átomo do hidrogênio possui um elétron. Se tivermos sorte, esse elétron produzirá um clarão isolado e bem definido na nossa tela de matéria condensada. Isso é tudo. Os elétrons serão sempre observados como partículas, não importa o tamanho da aparelhagem de medida. Os paradoxos quânticos não provêm da relação entre os tamanhos dos átomos e dos seres humanos (uma mera diferença quantitativa), mas

de uma diferença qualitativa, mais fundamental, entre as experiências dos seres humanos e das entidades atômicas. Como Bohr e Heisenberg ressaltaram, a experiência humana é inevitavelmente clássica, mas os átomos não existem de maneira clássica.

Na verdade, já sabemos o que se assemelharia à vida no interior de uma função ondulatória atômica, porque caminhamos no "interior dos átomos" sempre que saímos de casa numa noite estrelada.

AS ONDAS MANDATÁRIAS DA LUZ DAS ESTRELAS

O tamanho de um átomo é igual ao seu domínio de possibilidades espaciais — não mais do que alguns bilionésimos de uma polegada. Os átomos excitados podem se expandir até dobrarem o seu tamanho, e ainda serão pequenos demais para serem vistos. Por outro lado o domínio es-

pacial de um fóton isolado, proveniente de uma estrela distante, pode variar desde cerca de um metro de diâmetro até uma área do tamanho do Texas.

O domínio espacial dos fótons de cada estrela é inversamente proporcional ao tamanho angular aparente da estrela. As estrelas pequenas e distantes possuem um domínio enorme; os domínios das estrelas grandes e próximas são menores. O menor domínio existente no céu noturno é o da estrela Betelgeuse, uma gigante vermelha localizada no ombro de Órion, cujo domínio tem, na Terra, cerca de três metros de diâmetro. Isso significa que a onda mandatária de cada fóton proveniente de Betelgeuse é maior do que uma banheira.

O princípio da incerteza de Heisenberg explica os grandes domínios espaciais da luz das estrelas. Imaginemos um feixe de fótons partindo de Betelgeuse (a uma distância de 520 anos-luz) na direção da Terra. A menos que esses fótons

possuam movimento lateral extremamente pequeno, eles deslizarão para fora do feixe durante os 500 anos de viagem. Para sair de uma estrela distante e atingir um alvo tão pequeno quanto os nossos olhos abertos, um feixe de luz estelar precisa ter uma quantidade de movimento lateral de dispersão mínima. De acordo com o princípio de Heisenberg uma pequena dispersão na quantidade de movimento (lateral) *exige* uma dispersão compensatória grande na posição (lateral). Esta é a razão pela qual os fótons de Betelgeuse têm a largura de três metros. Outras estrelas têm funções ondulatórias maiores.

Qual será a espessura dessas ondas mandatárias de fótons que vêm das estrelas? Aplicando o princípio da incerteza na direção do movimento do fóton, calculamos um domínio de possibilidade posicionai menor do que a espessura da película de uma bolha de sabão. Essas ondas mandatárias estelares se assemelham a

enormes panquecas de pequeníssima espessura, arremetendo sobre o céu noturno com a velocidade da luz.

Não vemos nada incomum quando estamos no interior de uma onda mandatária de um fóton. Em particular, um detector de fótons (nossos olhos, por exemplo) exposto à luz proveniente de Betelgeuse não vê nenhum disco luminoso de três metros de extensão e espessura diminuta. Tudo o que o olho ou a tela de fósforo vê é um clarão luminoso ocasional. Toda medição direta da luz mostra-a como sendo uma partícula pontual — o fóton medido, do mesmo modo que o elétron medido, parece ter raio zero. Se pudéssemos penetrar furtivamente no interior de um átomo de hidrogênio, certamente veríamos a mesma coisa. Os elétrons individuais, assim como os fótons individuais, sempre aparecem como partículas nos sensores dos nossos instrumentos, mesmo nos casos em que as suas funções ondulatórias são maiores do

que a aparelhagem que as mede.

A despeito do fato de nossos detectores só mostrarem nada mais que partículas pontuais, os físicos aprenderam a medir o tamanho dessas ondas mandatárias estelares.

Nos confins do interior da Austrália, a trezentas milhas de Sidnei, na vila de Narrabi, o físico britânico Robert Hanbury Brown construiu o primeiro interferômetro estelar de intensidade do mundo. Brown completou a montagem desse instrumento em 1965 e utilizou-o para determinar o diâmetro angular das estrelas, através da medida da extensão das ondas mandatárias de seus fótons.

O diâmetro angular aparente de uma estrela mede o espaço que ela ocupa no céu. O sol e a lua por exemplo, ocupam cada um cerca de meio grau da abóbada celeste. (A largura da onda mandatária de um fóton do sol é de somente uma pequena fração do milímetro.) O diâmetro angular das estrelas é pequeno demais para ser

medido diretamente; todas as estrelas aparecem como pontos, mesmo nos maiores telescópios. Devido aos seus pequenos tamanhos aparentes, os diâmetros das estrelas somente podem ser medidos indiretamente, mediante instrumentos como o interferômetro estelar.

O interferômetro de Hanbury Brown é constituído de dois espelhos de seis metros, do tipo usado em holofotes, montados sobre trilhos. Cada espelho capta a luz de uma mesma estrela e a focaliza num detector de fótons. Em Narrabi, os sinais de cada detector de fótons são combinados eletronicamente, mas a operação será mais facilmente visualizada se imaginarmos que cada espelho dirige o seu feixe de luz estelar para uma gigantesca tela de fósforo (Fig. 7.3). Quando os espelhos estão próximos um do outro, surge na tela um padrão de interferência, porque a luz de um dos espelhos fica ora em fase, ora fora de fase com a luz do outro espelho.

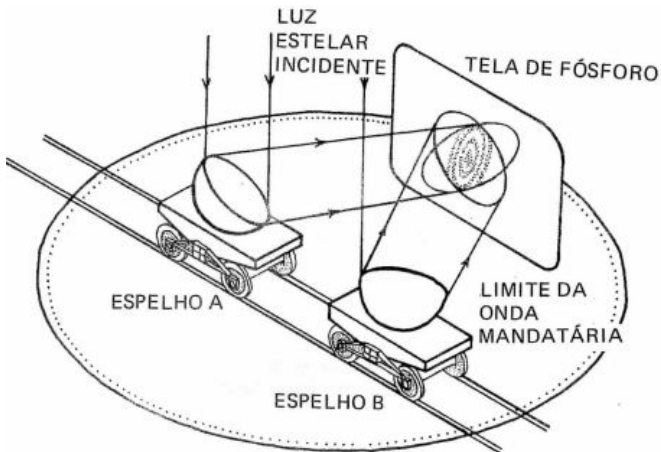



Fig. 7.3. O interferômetro estelar, medindo o tamanho da onda mandatária de um fóton. Cada espelho capta a luz proveniente de uma mesma estrela e a focaliza na tela de fósforo. Um padrão de interferência surgirá na tela, e permanecerá visível enquanto os dois espelhos estiverem no interior da onda mandatária do fóton, indicada pelo círculo representado pelas duas linhas, uma cheia e a outra pontilhada. Quando os espelhos se deslocarem para fora desse círculo — limite da função ondulatória do fóton — o padrão de interferência desaparecerá.

Sempre focalizados na mesma estrela, os espelhos são deslocados de modo a se afastarem um

do outro. O padrão de interferência desaparece quando o afastamento se torna tão grande que os espelhos saem da função ondulatória do fóton. As funções ondulatórias de algumas estrelas são maiores do que a ferrovia de Brown, que pode medir funções ondulatórias de até cento e vinte metros de diâmetro — o tamanho da onda mandatária do fóton de Zeta Orionis, a estrela mais brilhante do cinturão de Orion. As estrelas cujo tamanho angular é menor do que o da Zeta Orionis possuem ondas mandatárias proporcionalmente maiores. As funções ondulatórias de algumas estrelas muito distantes são consideravelmente mais largas do que o continente australiano.

Na tela de fósforo, o padrão de interferência é formado por um fóton de cada vez: os fótons são, indubitavelmente, partículas pontuais. Contudo, o padrão em si só pode ser explicado por algo de natureza ondulatória — representado pela onda mandatária do fóton — que

seja capaz de atingir simultaneamente os dois espelhos e ser refletido na direção da tela, onde os dois reflexos se juntam para formar o padrão listrado característico da interferência ondulatória. Do mesmo modo que a experiência da difração em um orifício, o interferômetro estelar mostra a coexistência dos efeitos de onda e partícula. Nada senão partículas é jamais detectado diretamente, mas o padrão formado por essas partículas só pode ser causado por algum tipo de onda — a forma que a luz parece assumir quando não está sendo medida. O interferômetro, de fato, determina os limites dessa onda quântica e mostra que o tamanho dessas ondas — o mesmo tipo de onda de que é feito o átomo — não está necessariamente restrito às dimensões atômicas.

Para entender a teoria atômica, como oposto de meramente saber utilizá-la, precisamos responder a duas perguntas: 1. O que realmente significa a função ondulatória? (a questão da

interpretação); 2. O que acontece no decurso de uma medição quântica? (o problema da medição). A crise da realidade quântica ocorre porque os físicos não possuem boas respostas para nenhuma dessas questões. Neste capítulo, examinamos resumidamente a questão da interpretação. Olharemos em seguida o problema da medição.

8. "E Então Acontece um Milagre": O Problema da Medição Quântica

> Nenhuma linguagem que se presta à visualização pode descrever os saltos quânticos.
> Max Born

Uma onda de gravidade é uma encrespação na curvatura do espaço- tempo. A teoria geral da relatividade, de Einstein, prevê a formação de ondas de gravidade onde quer que grandes massas entrem em aceleração — por exemplo, nos sistemas binários de estrelas. Se Einstein está certo, ondas de gravidade provenientes de tooas as partes do céu passam através da Terra todos os dias.

Uma onda de gravidade deforma todos os

objetos em seu caminho, comprimindo-os em uma direção e distendendo-os na direção ortogonal. Considerando a ubiqüidade das ondas de gravidade, todos os objetos que vemos estão pulsando permanentemente, sob o ritmo gravitacional das estrelas distantes. Contudo, comparada à força elétrica de coesão, a gravidade é excessivamente fraca; consequentemente, a deformação diária dos objetos comuns, devida à gravidade, não tem sido detectada.

O DETECTOR SOVIÉTICO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Na Universidade de Moscou, Vladimir Braginski vem tentando detectar as ondas de gravidade, mediante o acompanhamento de diminutas alterações da forma de um cilindro de safira com meia tonelada de peso. Braginski escolheu esse exótico material porque, após atingida, a safira continua trepidando por mais tempo que

a *maioria* dos outros materiais. A prolongada emissão de som da safira permite que um número máximo de medições seja feito antes que se desvaneça o impacto causado pela onda de gravidade. Para isolá-la dos ruídos terrestres a safira soviética está suspensa por fios numa câmara de vácuo e submetida a uma temperatura próxima do zero absoluto.

Até agora, Braginski e seus colegas não observaram nenhuma onda de gravidade e estão trabalhando no sentido de reduzir o ruído nos detectores de posição que registram a distorção da barra de safira. Conseguindo uma redução do ruído, equivalente a várias ordens de grandeza, os físicos russos esperam chegar a um ponto em que a sensibilidade de seus instrumentos fique limitada somente pela natureza quântica da barra de safira.

Considerada como entidade quântica, a safira está sujeita ao princípio da incerteza de Heisenberg: qualquer medida que determine

com precisão o seu atributo posição, ampliará,' necessariamente, o seu domínio de possibilidade da quantidade de movimento. De modo geral, o princípio da incerteza não limita a precisão com que se pode medir *um atributo isolado,* mas restringe a precisão mútua da medida de *dois atributos conjugados.* No que diz respeito ao princípio da incerteza, pode-se medir a posição tão acuradamente quanto se queira. Como o grupo de Braginski está somente interessado na posição da barra — mais precisamente na posição dos limites que definem a sua forma — não se deveria esperar que eles se preocupassem com a variância da quantidade de movimento.

Os russos poderiam, de fato, ignorar a variância da quantidade de movimento da barra, uma vez que estão planejando fazer somente uma medida de posição. Contudo, em prol da confiabilidade, eles precisam medir repetidamente a posição; quanto mais medições, me-

lhor. Melhor ainda, se a barra pudesse ser continuamente medida.

A primeira medição acurada da posição provoca, através do princípio da incerteza, uma ampla variância da quantidade de movimento. Pela mesma razão que um conjunto de partículas com diferentes quantidades de movimento rapidamente se separarão, esse espalhamento induzido na quantidade de movimento logo resultará num espalhamento da posição da barra. A quantidade de movimento é exatamente o atributo cuja incerteza realimenta a incerteza do atributo posição. Braginski denomina uma tal situação — uma medida acurada de um atributo é deteriorada pela retroação do espalhamento de Heisenberg em seu atributo conjugado — *mensuração quântica de demolição.* Para essas mensurações, a natureza quântica da barra de safira estabelece um limite final para a precisão com que se pode conhecer a posição da barra.

Braginski e outros físicos teóricos veem, contudo, uma abertura na teoria quântica que lhes permite contornar esse limite fundamental. Além da posição e quantidade de movimento, a barra de safira possui uma infinidade de outros atributos externos — um para cada família de formas ondulatórias da configuração espacial de sua onda mandatária. Embora cada atributo e seu correspondente atributo conjugado se restrinjam mutuamente, devido ao princípio da incerteza, *nem todo atributo está sujeito à demolição quântica.*

Braginski e seus colegas estão particularmente interessados em um atributo chamado X_1, que se poderia imaginar como sendo constituído, meio a meio, de posição e quantidade de movimento combinadas ondulatoriamente numa certa relação de fase. O atributo X_2 conjugado de X_1 é também composto meio a meio de posição e quantidade de movimento, mas combinadas em outra relação de fase. Como acon-

tece a outros atributos conjugados, os domínios de X_1 e X_2 estão mutuamente limitados pelo princípio da incerteza, mas, ao contrário do que acontece com a posição e a quantidade de movimento, o espalhamento das possibilidades de um desses atributos fica confinado a esse atributo, e não realimenta o seu atributo conjugado.

Se a incerteza de Heisenberg no atributo X_2 não contamina o seu atributo conjugado, a natureza quântica da barra de safira não impõe qualquer limitação às medições repetidas de X_t. A precisão será então limitada somente pela engenhosidade do experimentador. A uma tal observação potencialmente à prova de erro, Braginski dá o nome de medição quântica não demolidora (medição QND). Além de aprimorar os futuros detectores de ondas de gravidade, os físicos planejam, ainda, utilizar as medições QND para reduzir o ruído produzido pela incerteza de Heisenberg nas comunicações a raio la-

ser.

Em razão de que o domínio de possibilidade de X_1 pode ser tão reduzido quanto se queira, as formas ondulatórias que correspondem a atributos QND, tais como $\mathbf{X_1}$ **e** $\mathbf{X_2}$ passaram a ser denominadas "estados espremidos".

A sugestão de Braginski de detectar ondas de gravidade, em Moscou, através da medição de um atributo não sujeito à demolição (estado espremido), ao invés do mais convencional atributo posição, ilustra dois aspectos importantes de uma medição quântica: 1. A teoria quântica se aplica, em princípio, a todas as entidades físicas, independentemente das suas dimensões; 2. Um passo crucial em qualquer medição quântica é a escolha do atributo que se vai observar.

Embora a teoria quântica tenha sido originalmente projetada para lidar com diminutos átomos invisíveis, ela não deixa de atuar quando as entidades se tornam grandes e passíveis

de serem vistas. Já fizemos contato com ondas mandatárias de luz estelar maiores do que áreas de estacionamento de veículos. E agora os físicos russos computam uma enorme safira como se ela fosse uma entidade quântica em nada diferente de um fóton de luz.

A OPÇÃO MÉTRICA QUÂNTICA

Chamamos de opção métrica quântica a capacidade do experimentador para selecionar livremente o atributo que irá medir. No caso do detector de ondas de gravidade, de Moscou, a opção de medir o atributo X_1 ao invés da posição, propicia um conhecimento mais preciso da deformação da barra de safira. O exercício da opção métrica é parte necessária de qualquer medição quântica.

Existem dois sentidos em que se pode dizer que um observador "cria a realidade" quando faz uma medição quântica. O primeiro tipo de

criação da realidade ocorre sempre que um observador exerce a sua opção métrica; o segundo tipo de realidade criada pelo observador tem lugar quando este provoca o "colapso da *função* ondulatória". A maior parte das afirmações em favor de uma realidade criada pelo observador se refere aos atos do primeiro tipo.

Considerando que a teoria quântica representa a entidade quântica através de uma onda e os atributos através de formas ondulatórias, é fácil ver como o observador pode ser acusado de "criar a realidade" quando seleciona o atributo que irá observar. A operação-chave da medição quântica é a seleção de um prisma de família de formas ondulatórias para a análise da função ondulatória do sistema. O prisma selecionado determina o atributo que se quer observar.

Imaginemos a análise de formas ondulatórias de uma onda comum — o ruído do tráfego em uma esquina movimentada, por exemplo.

Exercendo a nossa opção métrica analisaremos esse ruído em termos de formas ondulatórias da *tuba.* Se decidirmos olhar a nossa amostra sonora dessa maneira, observaremos que o ruído do tráfego consiste de certas porcentagens de notas de tuba de várias frequências ligadas por relações de fase especiais. Mas o ruído do tráfego é *realmente* uma orquestra de tubas? Claro que não.

O ruído do tráfego fornece a matéria-prima para essa medição, mas cabe ao observador fazer a escolha das formas ondulatórias componentes. Encontrar quantidade de movimento na onda de um elétron é o mesmo que encontrar tubas na onda do tráfego. Só medimos uma certa quantidade de movimento de um elétron porque (graças à opção métrica) contribuímos para que haja quantidade de movimento. Não se pode dizer que os elétrons possuam, realmente, atributos dinâmicos próprios. Os atributos que eles parecem ter dependem de como de-

cidimos analisá-los. Um relógio somente pode ser desmontado de uma maneira; ele é constituído de partes definidas. Uma onda, por outro lado, não possui partes: podemos dividi-la da maneira que quisermos. Porém, nenhuma dessas divisões existe *a priori;* o tipo de partes que uma onda parece possuir depende de como *nós a* seccionamos. A natureza ondulatória do mundo nos torna, em um certo sentido, cocriadores de seus atributos.

Existe, no entanto, um sentido em que se pode dizer que um sistema quântico possui atributos próprios. Esse sentido é o mesmo em que o ruído do tráfego possui sua própria identidade, independentemente de como decidimos analisá-lo. O ruído do tráfego não é produzido por tubas, ele é produzido pelo tráfego. Se analisássemos esse ruído com um prisma específico para formas ondulatórias de tráfego, ele não se dividiría em componentes. No Capítulo 5, denominamos "prismas afins" esses prismas

que não dividem as configurações ondulatórias que analisam.

Suponhamos que, ao analisar um feixe de elétrons com um prisma de quantidade de movimento, a onda mandatária do feixe não se divida. Isso significa que a sua função ondulatória é puramente senoidal (código quântico para quantidade de movimento). Experimentalmente, verificaríamos que esse feixe de quons possuiria um único valor preciso para a quantidade de movimento. Nesse caso particular, poderíamos dizer que cada elétron do feixe possui uma quantidade de movimento específica, que não é criada pelo observador. Em outras palavras, no caso excepcional em que a observação é efetuada mediante um prisma afim, pode-se dizer que o experimentador está vendo o que realmente existe ali, e não o que ele pôs ali. Contudo, embora esses elétrons pareçam possuir quantidades de movimento do mesmo modo que os objetos clássicos a possuem, nenhum dos seus ou-

tros atributos possui um único valor. Esses outros atributos surgem através da opção métrica quântica — primeiro tipo de realidade criada pelo observador.

A medição de um feixe de quons cujos atributos dinâmicos possuem um único valor é uma ocorrência relativamente rara. A maioria das medições quânticas mostra algum espalhamento em seus resultados. Nesses casos, pode-se dizer que o observador cria, parcialmente, os atributos que observa, da mesma maneira que encontraremos, no ruído do tráfego, formas ondulatórias da tuba, se estivermos tentando encontrá-las. Utilizando o teorema sintetizador, podemos exprimir uma situação de quons em termos de uma infinidade de diferentes formas ondulatórias de atributos; a escolha cabe ao observador. Certos atributos são tão frequentemente escolhidos pelos pesquisadores, para caracterizarem os sistemas físicos, que merecem ser denominados atributos principais. Damos a

todos os outros a denominação de atributos secundários.

No *"espaço de configurações"*, onde vivem as formas ondulatórias que representam o *movimento externo* de um quon, os atributos principais são a posição e a quantidade de movimento. Entre os atributos secundários que residem no espaço de configurações incluem-se o imaginário "atributo piano" e os atributos QND X_1 e X_2, de Braginski.

No *"espaço de momentos angulares intrínsecos"*, onde vivem as formas ondulatórias que representam o *movimento interno* de um quon, os atributos principais são as orientações S_x, S_y e S_z do *spin* em três direções ortogonais. Para a luz e muitas outras entidades quânticas, o atributo secundário mais importante no espaço de momentos angulares intrínsecos é a polarização.

O ATRIBUTO POLARIZAÇÃO DE UM

RAIO DE LUZ

Como exemplo concreto do problema da medição quântica, vejamos como um experimentador empreende a medida da polarização de um raio de luz. A polarização é o tipo mais simples de atributo dinâmico, porque admite somente dois valores possíveis. Um valor a menos transformá-lo-ia num atributo estático. No entanto, o atributo polarização é bastante complexo para ilustrar toda uma série de complicações quânticas.

A polarização é um atributo ligado a uma determinada direção no espaço. Para cada direção, um fóton isolado possui apenas duas opções: ou ele está inteiramente polarizado nessa direção, ou está inteiramente polarizado em ângulo reto com essa direção. As direções de polarização que nos interessam no momento são as ortogonais — aquelas que fazem ângulo reto com a trajetória do raio de luz. A fim de figurar

essas direções de polarização, imaginemos o raio de luz passando pelo centro do mostrador de um relógio. As posições do ponteiro das horas representarão todas as possíveis direções de polarização. Se convencionarmos que doze horas equivale a zero graus, as direções de polarização poderão ser indicadas tanto pela hora quanto por um ângulo ou, ainda, por denominações convencionais de direção, tais como horizontal ou vertical. Doze horas, por exemplo, representará a polarização vertical; três horas representará a polarização horizontal. A polarização será representada por apenas meio mostrador do relógio; nove horas e três horas, por exemplo, representam a mesma direção — polarização horizontal.

Para figurar uma medição de polarização, imaginemos que somos um batedor postado na base tentando rebater fótons lançados pelo arremessador. (Um lançamento violento é, aqui, *realmente* violento: a bola se desloca com a ve-

locidade da luz.) Seguramos o bastão num determinado ângulo; se o fóton estiver polarizado nesse ângulo, marcaremos um ponto; caso contrário, será um ponto perdido, e ficaremos sabendo que o fóton estava polarizado perpendicularmente à direção do bastão.

Um resultado binário, vinculado a uma única direção, é o máximo que a teoria quântica nos permite obter em relação ao atributo polarização de um fóton isolado. Tudo o que podemos descobrir, quando fazemos uma dessas medições, é se o fóton está polarizado na direção que escolhemos (ponto ganho), ou em ângulo reto com essa direção (ponto perdido). A nossa opção métrica quântica para uma medição de polarização consiste na escolha, para cada fóton, do ângulo em que seguramos o bastão. Considerando que podemos segurar o bastão numa só direção de cada vez, não ficaremos sabendo muita coisa a respeito da polarização global de um fóton isolado, mas poderemos es-

tudar a polarização global de um *feixe* de fótons, segurando o bastão num ângulo diferente para cada fóton de um mesmo feixe.

Para todos os raios de luz considerados aqui, os fótons estarão no mesmo estado quântico, representados pela mesma onda mandatária. De acordo com o que afirma a ontologia ortodoxa, esses fótons, antes de medidos, são absolutamente idênticos e, consequentemente, a medição de um feixe formado por esses fótons nos informará tudo que é possível saber, não só a respeito do feixe, mas, também, a respeito de cada fóton do feixe. Cada ângulo do bastão corresponde a um diferente atributo de polarização, que chamaremos de $P(\phi)$. Para medir o atributo $P(\phi)$de um determinado raio de luz, seguramos o bastão num ângulo ϕ e registramos o número de pontos ganhos e perdidos.

Três tipos de luz polarizada são particularmente importantes: 1. Se registrarmos 100% de pontos ganhos, diremos que o raio está com-

pletamente polarizado na direção ϕ. 2. Se registrarmos 100% de pontos perdidos, o raio estará completamente polarizado na direção ortogonal a ϕ. 3. Se registrarmos 50% de pontos ganhos e 50% de pontos perdidos, o raio de luz estará *não polarizado* na direção ϕ. Se os resultados da medição não pertencerem a uma dessas três categorias, o raio de luz estará parcialmente polarizado. A luz do céu azul e a refletida pelo mar são exemplos de polarização parcial.

Um raio de luz que, quando medido, se revela não polarizado em todas as direções, é considerado como completamente não polarizado. A luz do sol, a das lâmpadas incandescentes e a da iluminação urbana são completamente não polarizadas.

O princípio da incerteza, aplicado ao atributo polarização, exige que um raio de luz só possa ser completamente polarizado em uma única direção: se *P*(ϕ) resulta em 100% de pon-

tos ganhos, para determinado ângulo *(ϕ)*, todos os outros ângulos deverão necessariamente dar menos de 100% de pontos ganhos. A luz do raio laser e a luz que passa por um filtro polaroide (usado em óculos escuros e nos óculos especiais para se ver filmes em três dimensões) são exemplos de luz completamente polarizada em uma direção.

Para ilustrar o problema da medição quântica, consideraremos apenas dois atributos polarização: *P(0),* onde o bastão permanece a zero graus, e *P(45),* onde o bastão é segurado a quarenta e cinco graus. Quando o bastão está segurado a zero grau, medimos *P(0),* que pode assumir somente dois valores: ou um ponto ganho, indicando um fóton verticalmente polarizado (fóton *V),* ou um ponto perdido, indicando um fóton horizontalmente polarizado (fóton *H)*. Quando o bastão está segurado a quarenta e cinco graus, medimos *P(45),* que pode assumir dois valores: ou um ponto ganho, indicando um

fóton diagonalmente polarizado (fóton *D),* ou um ponto perdido, indicando um fóton polarizado na contradiagonal (fóton CD). Diagonal e contradiagonal são nomes convencionais para as direções a 45° e -45°, respectiva mente.

O objeto de nossa medição quântica é um raio de luz completamente polarizado a 45°. Todo fóton desse raio é um fóton *D.* Experimental mente, isso significa que, escolhendo 45° como nossa opção métrica, obteremos 100% de pontos ganhos. Não efetuaremos uma medição trivial como essa mas, ao invés disso, faremos a medição da polarização desse raio a zero grau.

A teoria quântica nos diz que a forma ondulatória *D*, que representa um raio completamente polarizado a 45°, pode ser dividido em partes iguais de formas ondulatórias *H* e *V* adicionadas em uma determinada fase. Poderíamos representar esta relação entre formas ondulatórias da seguinte maneira:

$$D = H \, \Theta \, V$$

onde Θ representa uma adição ondulatória.

Essa relação matemática entre formas ondulatórias de polarização significa que, se fizermos passar uma forma ondulatória *D* num prisma analítico cujas saídas sejam formas ondulatórias *H* e *V*, o prisma dividirá a onda *D* em duas ondas, uma *H* e outra *V*, de amplitudes iguais.

A medição quântica que corresponde a essa análise de formas ondulatórias consiste em incidir um feixe puramente polarizado a 45° num selecionador de atributos que separe os fótons *H* dos fótons *V* de qualquer raio de luz. Um tal selecionador corresponde a segurar o bastão a zero grau, medindo o que anteriormente denominamos atributo *P(0)*.

Devido ao fato de que as formas ondulatórias *D* consistem de partes iguais de formas on-

dulatórias *H* e *V,* a teoria quântica prevê (através da correspondência onda-atributo) que uma medição *P(0)* de um raio polarizado puramente a 45° fornecerá uma mistura meio a meio de fótons *H* e *V;* o raio *D* parecerá *não polarizado* na direção zero grau. A investigação de como a natureza consegue, de fato, produzir essa mistura meio a meio nos faz penetrar brusca e profundamente no âmago do problema da medição quântica. Antes de discutirmos esse problema, mostraremos como uma medição real de polarização poderia ser efetuada com o equipamento que corresponderia ao "bastão" da nossa analogia com o beisebol.

COMO CONSTRUIR UM MEDIDOR DE POLARIZAÇÃO

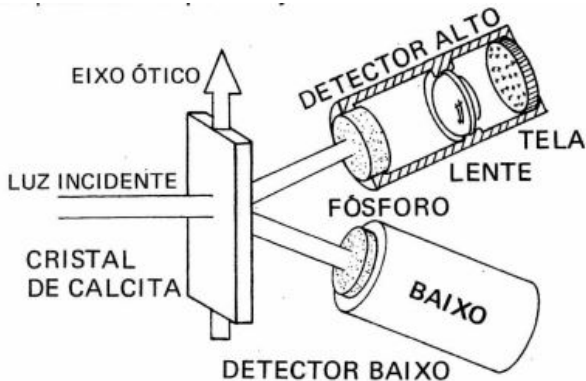



Fig. 8.1 Construção de um medidor de P. Para medir o atributo polarização *P(0)* denominado polarização vertical variável, polarização a zero grau ou polarização a 12 h), um cristal de calcita, cujo eixo ótico aponta na direção vertical, divide o raio de luz em dois feixes de fótons, todos polarizados ao longo do eixo ótico (feixe alto) ou todos polarizados a noventa graus com o eixo ótico (feixe baixo). Detectores de fótons constituídos basicamente de uma camada de fósforo e uma tela fotossensível registram o canal que cada fóton realmente percorreu. O resultado da medição consiste na totalização das contagens registradas nos canais alto e baixo.

No laboratório, o raio de luz atravessa um cristal de calcita cujo eixo ótico aponta numa certa direção. A calcita é um cristal birrefrin-

gente, que divide o raio de luz em dois feixes: um feixe alto, constituído de fótons polarizados ao longo do eixo ótico, e um feixe baixo constituído de fótons polarizados em ângulo reto com o eixo ótico. Mais informações sobre esse interessante mineral podem ser encontradas no apêndice do presente capítulo.

Para se saber se um determinado fóton se dirige para cima ou para baixo, coloca-se detectores de fótons em cada canal. Esses detectores são constituídos por uma tela de fósforo que produz um clarão quando excitada por um fóton, e uma lente que concentra a luz do clarão, focalizando-a numa placa sensível (semelhante a um elemento de célula solar). Essa placa, por sua vez, reage à luz, produzindo um sinal elétrico. A Fig. 8.1 mostra um medidor de polarização completo, ajustado para medir o atributo polarização *P(0),* i.e., o eixo ótico da calcita está alinhado a zero grau. O sinal elétrico proveniente do detector de fótons é am-

plificado e enviado a um gravador (não mostrado na figura) que imprime na fita um *A* ou um *B,* dependendo de qual detector, o alto ou o baixo, tenha sido excitado pelo fóton. A Fig. 8.2 mostra duas das várias ajustagens possíveis desse medidor de polarização. Quando o eixo da calcita está ajustado em 12 h (zero grau), o medidor de polarização mede o atributo *P(0):* os sinais alto e baixo correspondem, respectiva mente, a fótons *V* e *H.* Quando o eixo da calcita está ajustado em 1:30 h (45 graus), o medidor de polarização mede o atributo *P(45):* os sinais alto e baixo correspondem, agora, a fótons *D* e *CD.*

2 Medição do atributo polarização *P(0)* e do atributo polarização *P(45)*. Quando o cristal de calcita ustado a zero grau, o medidor *P* está medindo o atributo *P(0)*. Quando o cristal está voltado na 45°, ele mede o atributo *P(45)*. As polarizações medidas nessas duas experiências definem as qua- eções (*H, V, D* e *CD*) de polarização do fóton, discutidas no texto.

SEIS VARIAÇÕES SOBRE O PROBLEMA DA MEDIÇÃO QUÂNTICA

Feita essa breve digressão sobre a física experimental, estamos prontos para atacar o problema da medição. Comecemos com um raio de luz completamente polarizado **EM DE** meçamos o seu atributo *P(0)* com um cristal de calcita ajustado em zero grau. O raio se dividirá em dois feixes de fótons *H e D,* tendo cada um o mesmo número de fótons. Mas o que estará realmente acontecendo quando um raio de luz se divide em dois?

Nos termos dessa simples experiência - medição da polarização horizontal e vertical de um raio de luz completamente polarizada a 45 graus — é fácil enunciar o problema da medição quântica. Considerando que esse problema tem grande importância para a questão da realidade quântica, iremos expressá-lo de seis ma-

neiras diferentes. Embora possa ser enunciado de modo simples, esse problema não é de fácil solução. Todas as soluções até hoje apresentadas pelos físicos conduzem a realidades extravagantes e/ou santificam algum aspecto do ato de medir.

É difícil acreditar que a natureza tenha conferido ao ato em que os seres humanos fazem contato com as entidades quânticas um status especial, não conferido a todas as outras interações presentes no universo. Qualquer interpretação da medição, que atribua poderes sobrenaturais ao ato de medir, deverá ser olhada com desconfiança. Há qualquer coisa filosoficamente improvável na ideia de um cosmo centrado na medição. O modo como vemos o mundo deve, certamente, depender do modo pelo qual o medimos, mas seria absurdo acreditar que aquilo que o mundo realmente *é* seja determinado pela capacidade de observação dos seres humanos. "As medições são acontecimentos", diz o

físico da marinha americana T. E. Phipps, "mas elas são, pela ordem, os últimos dos acontecimentos do mundo. Seria aviltar a física, para não dizer o mundo, acorrentá-la aos seus próprios instrumentos, através de qualquer implicação linguística no sentido de que as medições são *tudo* o que acontece no mundo."

Aqui estão, portanto, seis variações sobre o problema da medição quântica, que têm desconcertado os físicos por mais de meio século:

1. Os físicos não podem representar a situação física de um sistema quântico em termos clássicos; eles o expressam em termos de *ondas quânticas de possibilidade.* Por outro lado, o instrumento de medida e o resultado dessa medida não podem ser expressos em termos de possibilidades; como qualquer outro aspecto da experiência humana esses resultados precisam ser descritos em termos de uma *realidade clássica*

concreta. O problema da medição quântica é este: em que ponto entre a entrada do fóton e a observação de uma marca definida *(B,* por exemplo) na fita de saída, ocorre a transição de uma para outra dessas duas radicalmente diferentes formas de existência? *Onde colocaremos o "corte" que separa o mundo quântico do mundo clássico?*

2. De acordo com a ontologia ortodoxa, e por estarem todos no mesmo estado, a situação física de cada fóton é idêntica à de todos os outros. Porém, os resultados registrados na fita não são os mesmos. *Em que ponto do processo de medição as entidades quânticas idênticas começam a se diferenciar?*

3. De acordo com a ontologia ortodoxa, após ser dividido pelo cristal, cada fóton *D* permanece num estado de pura possibilidade. Mas os resultados da medição constituem, em si, fatos reais, e não possibilidades.

Em que ponto do equipamento a possibilidade se transforma em realidade?

4. De acordo com a ontologia ortodoxa, cada fóton *D* segue as duas trajetórias através do cristal analisador, e ocupa simultaneamente os canais *H* e *V*. Contudo, para cada fóton, apenas um canal realmente emite o sinal (ou o canal *H* ou o canal *V*, mas não os dois) e imprime a sua marca na fita de saída. *Quando, no processo da medição quântica, as duas trajetórias passam a ser uma só?* E o que acontece com a trajetória não seguida?

5. De acordo com a ontologia ortodoxa, nossa relação com a situação física de um quon, após este ter sido dividido pelo cristal analisador, é de ignorância quântica: não sabemos qual é a diferença entre o quon # 123 e o quon # 137, porque essa diferença não existe na natureza. Nem Deus pode distinguir dois quons que estão no mesmo es-

tado. Contudo, após mil fótons terem sido medidos, estamos convencidos de que a fita magnética realmente contém marcas que não são as mesmas para todos os fótons. Em outras palavras, antes de examinar a fita, nossa relação com esses resultados é de ignorância clássica. *Como e quando a ignorância quântica se transforma em ignorância clássica?*

6. Nossa variação final sobre o tema da medição quântica propõe a seguinte questão: *como e quando se dá o "colapso" da função ondulatória?* Veremos, mais adiante, o processo do colapso da função ondulatória, à luz do modelo quântico integral do ato de medir, desenvolvido por John von Neumann.

Note-se que o problema da medição parece provir do fato de tomarmos a sério a ontologia ortodoxa, e tentar compatibilizar os seus ensi-

namentos com aquilo que é realmente observado. Uma solução fácil para o problema da medição quântica seria simplesmente *negar a ontologia ortodoxa e* aceitar o modelo neorrealista do mundo. Não existe problema de medição nos modelos neorrealistas, mas eles apresentam um outro problema. O teorema de Bell nos diz que nenhum modelo neorrealista dará certo, a menos que inclua campos de força invisíveis, porém reais, e mais rápidos que a luz — uma condição que a maioria dos físicos considera inaceitável.

Aqueles que adotam a ontologia ortodoxa (a maioria dos físicos) classificam-se em dois grupos: os seguidores de Bohr e Heisenberg (copenhaguenistas) e os seguidores de John von Neumann.

A IMAGEM COPENHAGUENISTA DA MEDIÇÃO QUÂNTICA

Os copenhaguenistas consideram a experiência comum como sendo a realidade fundamental, não analisável, em cujos termos eles explicam os domínios do átomo. Para Bohr e Heisenberg, o mundo está, para sempre, dividido em dois tipos de realidades: a realidade quântica, que não poderemos jamais vivenciar, e a realidade clássica, que é a única que podemos vivenciar. A teoria quântica não é uma representação e muito menos uma descrição da realidade quântica; ela é uma representação da relação entre a realidade que nos é familiar e o totalmente inumano domínio do quon. Como diz Heisenberg: "A Interpretação de Copenhague vê as coisas e os processos que podem ser descritos mediante conceitos clássicos, i.e., o que é real, como o fundamento de qualquer interpretação física." O físico Wendall Furry, de Harvard, acompanha Heisenberg em sua elevação da realidade comum à posição de supremacia: "[Na interpretação de Copenhague,] a existência e a natu-

reza geral dos corpos e sistemas macroscópicos é assumida a *priori*. Esses fatos são logicamente anteriores à interpretação, e não se pode esperar que esta os explique."

Em outras palavras, a Velha Física tentou explicar os objetos macroscópicos em termos dos átomos que os constituem; a Nova Física explica os átomos em termos de objetos macroscópicos. No esquema invertido de Copenhague, há um sentimento de que *os átomos são feitos de instrumentos de medida,* e não o inverso. Como disse Heisenberg: "Somente uma inversão da ordem dessa realidade que aceitamos costumeiramente tornou possível a ligação, sem contradições, dos sistemas de conceitos mecânicos e químicos." É claro que os copenhaguenistas acreditam que seus instrumentos são feitos de átomos, como tudo mais, porém, essa maneira de pensar (instrumentos feitos de átomos) somente pode ser mantida por enquanto.

Uma característica curiosa da interpretação de Copenhague é que ela considera tanto o átomo quanto o instrumento de medida como sendo incompreensíveis. Não podemos entender o mundo quântico porque a sua natureza é completa mente estranha ao pensamento humano; não podemos explicar o mundo clássico porque a teoria quântica — a única base que os físicos possuem hoje para explicar alguma coisa — simplesmente considera inquestionável a existência do mundo clássico. Nas palavras de Furry, o mundo clássico é "logicamente anterior" à teoria quântica e "não se pode esperar que esta o explique". A teoria quântica prevê o modo pelo qual um instrumento de medida clássico responderá a um sistema quântico, mas a teoria propriamente não contém esses aparelhos de medição — nela não há nada senão ondas mandatárias. Felizmente para a prática da física, cada um de nós nasceu num mundo já habitado por esses inexplicáveis aparelhos de medi-

ção: nossos olhos são um exemplo.

De acordo com Bohr, a teoria quântica não descreve o sistema quântico, nem a aparelhagem de medição. Ela se aplica ao *relacionamento* existente entre esses dois tipos de seres conceitualmente opacos. Como o aparelho de medição não pode, em princípio, ser analisado, ele constitui o local perfeito para ali se colocar a solução do problema da medição. Na interpretação de Copenhague, todas as misteriosas transições entre os dois tipos de seres, os quânticos e os clássicos, ocorrem no interior do aparelho de medida ou, mais propriamente, na fronteira entre este e o sistema quântico. Vemos que a interpretação de Copenhague, além de não resolver o problema da medição, procura escondê-lo. Ela varre o problema para debaixo do tapete, para o único lugar do mundo inacessível ao escrutínio humano — as partes internas dos instrumentos de medida.

A IMAGEM DE VON NEUMANN DA MEDIÇÃO QUÂNTICA

O fato de que os copenhaguenistas precisaram dividir o mundo em duas partes, uma clássica (instrumento de medida) e outra quântica (sistema medido), desagradava a John von Neumann. O mundo possui, obviamente, uma só natureza, e *essa natureza não é clássica.* A fim de refletir a necessária unidade do mundo, von Neumann resolveu representá-lo por inteiro de uma só maneira, simbolizando tanto o sistema quanto o instrumento de medida por ondas mandatárias. O mundo de von Neumann é inteiramente quântico — não há nele uma só pitada de física clássica. Von Neumann descreveu esse mundo todo quântico em sua bíblia quântica: *Die Grundlagen.* Ela funciona. É possível representar o mundo inteiro (tanto o sistema, quanto o instrumento de medida) em termos de ondas mandatárias, se fizermos uma suposição.

A crucial suposição de von Neumann constitui a base de nossa sexta (e última) variação sobre o problema da medição quântica.

Como Feynman mostrou em sua versão da adição de histórias, dá teoria quântica, uma maneira de pensar no que os quons não medidos estão fazendo é imaginar que cada quon segue todas as trajetórias. A figuração de Feynman implica uma espécie de lei quântica do movimento, análoga à lei de Newton para o movimento dos objetos clássicos.

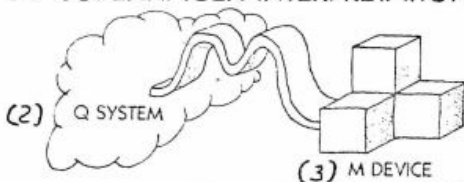
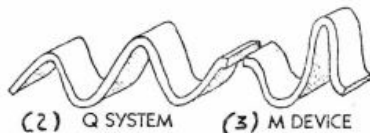
A. COPENHAGEN INTERPRETATION

B. ALL-QUANTUM INTERPRETATION

C. NEOREALIST INTERPRETATION

Fig. 8.3. Três imagens de uma medição quântica. A. A interpretação de Copenhague prevê tanto o sistema quântico quanto o instrumento de medida como teòricamente inacessíveis. Os atributos dinâmicos do sistema quântico não possuem valores determinantes; o instrumento M, por outro lado, é vivenciado "classicamente" pelos seres humanos — seus atributos parecem ter sempre valores determinados. A função ondulatória é uma ferramenta técnica que exprime o relacionamento existente entre esses dois modos de ser radicalmente diferentes. B. A interpretação toda quântica de von Neumann representa tanto o sistema quanto o instrumento M por ondas mandatárias. Para que essa descrição funcione, torna-se necessário, durante a medição, o "colapso" da função ondulatória do sistema. C. Os neo-realistas prevêem tudo (tanto o sistema quanto o instrumento M) constituído de partículas que agem umas sobre as outras por intermédio de ondas invisíveis, mais rápidas do que a luz.

Cada quon se desloca de um estado de ser para o seguinte, de acordo com um implacável imperativo territorial que o obriga a preencher simultaneamente todas as suas possibilidades. O fato de que a maioria dessas trajetórias será obliterada pela interferência destrutiva não altera, absolutamente, as ordens primordiais impostas ao quon: preenche toda a Terra com a tua essência! A lei do domínio garante que, independentemente de quantas possibilidades de um quon serão destruídas pela interferência ondulatória ou pela medição, sempre restará um certo resíduo mínimo. Um quon possuirá sempre, em quaisquer circunstâncias, um domínio de possibilidades pelo menos igual à constante de ação de Planck.

Essa é a lei quântica do movimento: Crescei e multiplicai- vos; partindo do vosso inviolável domínio, tomai todos os caminhos possíveis, abertos a vós. A evolução natural da onda

mandatária de um quon é expandir-se sem limite. Contudo, no ato da medição, um quon não pode realizar todas as suas possibilidades, posto que apenas um resultado realmente ocorre. Assim, em algum ponto entre a sua criação, no canhão de quons, e o seu registro como resultado experimental, um quon precisa repudiara lei universal do movimento, interromper a sua natural e desenfreada expansão, e contrair-se numa única possibilidade, correspondente ao resultado único, observado na medição.

Desse modo, de acordo com von Neumann, um quon obedece, não a uma, mas a duas leis do movimento. Em todo o universo, as ondas mandatárias estão se expandindo (Processo do tipo I, de von Neumann). Contudo, no ato da medição, e em nenhum outro lugar, as ondas mandatárias se contraem num resultado definido (Processo do tipo 11, de von Neumann). Após a contração, essas entidades ainda são ondas mandatárias; elas nunca se tornam objetos

clássicos. Consequentemente, quando o domínio de um atributo se contrai subitamente, o seu domínio de possibilidades conjugadas se expande explosivamente.

Os físicos chamam o Processo do tipo II de von Neumann de "o colapso da função ondulatória"; ele é também chamado de "salto quântico". A descrição toda quântica de von Neumann não funcionará a menos que um tal colapso realmente ocorra, como um processo físico, em todas as medições quânticas. Nossa sexta variação sobre o problema da medição é a seguinte: *Como e quando ocorre o colapso da função ondulatória?*

ONDE REALMENTE A FUNÇÃO ONDULATÓRIA ENTRA EM COLAPSO?

Von Neumann estava compreensivelmente curioso para encontrar uma localização natural para o colapso da função ondulatória, essencial

para a sua interpretação da teoria quântica. Examinou sistematicamente o processo de medida, procurando pistas de algum aspecto especial da medição que pudesse dar origem a um Processo do tipo II. Figurou o ato de medir dividido em pequenos passos, formando a chamada cadeia de von Neumann, estendendo-se desde o canhão de quons até à consciência do observador, onde se dá o registro final da medição. Cada processo intermediário é um elo da cadeia de von Neumann. Uma solução para o problema da medição, segundo o químico suíço Hans Primas, seria "seccionar a cadeia de von Neumann no primeiro ato que verdadeiramente se caracterize como ato de medição". Em outras palavras: onde, de fato, uma medição quântica é real mente efetuada?

Enquanto pesquisava uma localização natural para interromper a sua cadeia, von Neumann descobriu um fato matemático que aprofunda o mistério da medição. Von Neumann

mostrou que, *no que concerne aos resultados finais, pode-se seccionar a ca-* dei a e inserir um colapso em qualquer ponto que se queira. Isso significa que os resultados, em si, não podem fornecer qualquer indício sobre o ponto em que se localiza a divisão entre sistema e instrumento de medição.

A versão de von Neumann do problema da medição faz lembrar uma caricatura feita por Sidney Harris, um artista que se especializou em fazer troça sobre os pontos fracos da ciência. Um matemático tinha esboçado o seu trabalho no quadro-negro para um de seus colegas. O argumento era constituído pelos costumeiros símbolos incompreensíveis, mas, perto do fim, havia uma lacuna onde ele escrevera "E então acontece um milagre.” O matemático retoma, em seguida, o assunto e prossegue até chegar à sua conclusão lógica. O colega do matemático está apontando para a referida lacuna e dizendo,' "Penso que você deveria ser mais

explícito no Passo 2."

De cada lado do colapso da função ondulatória, von Neumann constrói impecáveis estruturas matemáticas bem conhecidas dos físicos quânticos — o mundo expresso sob a forma de ondas mandatárias. Contudo, separando esses dois lados do argumento — o mundo não medido e o mundo medido — existe uma lacuna lógica, onde von Neumann efetivamente escreve "E então acontece um milagre."

Von Neumann não pôde encontrar um lugar natural para colocar o seu "milagre". Tudo, afinal de contas é feito de átomos: não há nada de santo num instrumento de medida. Seguindo a cadeia que tem o seu nome, impulsionado por sua própria lógica, em desespero von Neumann agarrou-se ao seu único elo estranho: o processo pelo qual um sinal físico no cérebro se transforma numa experiência da mente humana. Esse é o único processo em toda a cadeia de von Neumann que não consiste de meras moléculas

em movimento. Relutantemente, von Neumann chegou à conclusão (Realidade Quântica * 7) de que a consciência humana é o local do colapso da função ondulatória.

Essa intervenção direta da consciência em todas as medições é o que chamamos "realidade criada pelo observador do segundo tipo" para distingui-la do tipo mais brando de atributos criados pelo observador vinculados à opção métrica quântica. No mundo criado pela consciência, de von Neumann, as coisas (ou pelo menos os seus atributos dinâmicos) não existem até que algum* mente real mente as perceba — uma conclusão drástica, à qual esse grande matemático foi forçado a chegar, por pura lógica, uma vez que decidiu tomar a sério o problema da medição quântica.

A Fig. 8.3 ilustra as três principais abordagens do que acontece em uma medição quântica: 1. A interpretação de Copenhague (de Bohr) divide o mundo em dois domínios, o

quântico e o clássico — ambos incompreensíveis — cujo relacionamento é representado por uma onda mandatária fictícia; 2. A imagem toda quântica, de von Neumann, representa tanto o quon quanto o instrumento M por ondas mandatárias ligadas pelo assim chamado colapso da função ondulatória; 3. David Bohm, Louis de Broglie e outros neorrealistas descrevem o mundo dos físicos — constituído de sistemas e instrumentos M — como constituídos somente de partículas ligadas por ondas (mais rápidas do que a luz).

Cada uma dessas abordagens da medição quântica tem as suas desvantagens; nenhuma fornece uma imagem completamente satisfatória do ato de medir. A interpretação de Copenhague confere ao instrumento de medida propriedades mágicas — por exemplo, a capacidade de reduzir uma possibilidade a uma realidade — ao mesmo tempo em que, em princípio, retira esses instrumentos da análise lógica. Von

Neumann restitui ao instrumento de medida um status igual ao do resto do mundo, mas transfere suas propriedades mágicas para um misterioso e evasivo evento: o colapso da função ondulatória; O modelo neorrealista da realidade não santifica o aparelho de medida, nem o ato de medir; as medições neorrealistas são interações apenas comuns. Contudo, o preço dessa solução neorrealista para o problema de medição quântica é a necessária existência de campos de forças invisíveis, cujas influências são mais rápidas do que a luz.

Por causa do insatisfatório estado em que se encontra o problema da medição, muitos físicos têm procurado encontrar soluções menos drásticas do que as de Bohr, von Neumann e Bohm.

AS ENTIDADES QUÂNTICAS PODEM TER ATRIBUTOS INDETERMINADOS?

Nos primeiros dias da teoria quântica, Erwin Schrbdinger perguntava a si mesmo se não seria possível formar um mundo todo quântico, como o de von Neumann, mas com uma diferença: embora os instrumentos de medida fossem inteiramente quânticos, seus efeitos quânticos seriam tão pequenos que, para todos os fins práticos, eles atuariam como se fossem clássicos. A proposta de Schrodinger se apoia no fato de que a constante de Planck é tão pequena que, na escala dos objetos comuns, ela se torna efetivamente igual a zero.

Schrodinger propôs a hipótese de que os atributos dos instrumentos de medida, bem como dos átomos, são intrinsecamente mal determinados, mas que a indeterminação dos instrumentos de medida é tão pequena (da mesma ordem de grandeza da constante de Planck) que, para os sentidos humanos, eles parecem possuir atributos bem determinados. Em outras palavras, Schrodinger supõe que um átomo isolado,

bem como um instrumento *M* individual, possuem, não uma quantidade de movimento, mas uma faixa de quantidades de movimento, e que essas quantidades de movimento não são potenciais, mas sim atuantes. A proposta de Schrodinger parece plausível, quando se percebe quão pequena é a constante de Planck se comparada aos atos comuns.

A dimensão da "ação", em física, é energia x tempo (erg x segundo). Um erg-segundo não é muito grande — aproximadamente igual à quantidade de ação contida no piscar de um olho. A constante de ação de Planck é incompreensivelmente menor do que o piscar de um olho: ela é igual a um erg-segundo dividido por um bilhão... dividido por um bilhão... e em seguida dividido, mais uma vez, por um bilhão. A constante de Planck é aproximadamente igual a 1×10^{-27} erg-segundo.

Os astrônomos calculam a largura de todo o universo em cerca de 10^{27} centímetros — a

distância que a luz percorreu desde a formação do universo. Um centímetro é mais ou menos a espessura de um torrão de açúcar. Uma linha de torrões de açúcar se estendendo através do universo conteria cerca de 10^{27} torrões. Essa fileira de torrões cobrirá não só. O sistema solar, não apenas a nossa galáxia ou nosso aglomerado de galáxias, mas todo o universo físico — tudo o que existe. Um piscar de olhos contém tantos quanta de ação quanto são os torrões de açúcar dessa longa linha branca. Tão minúscula é a escala dos eventos quânticos, quando comparada às ações da vida cotidiana, que o simples fato de os seres humanos terem percebido o mundo quântico constitui, por si só, um milagre. Se, como Schrödinger supôs, os atributos dos instrumentos de medição possuem uma faixa de indeterminação da ordem de uns pouco quanta, essa indeterminação será totalmente indetectável, como um vaga-lume ao sol do meio-dia Para os átomos, cuja entidade total é formada

de apenas alguns quanta de ação, a constante de Planck é muito grande. Para os instrumentos macroscópicos com ações na escala do piscar de um olho, alguns quanta a mais ou a menos não farão diferença perceptível.

A despeito do fato de que a indeterminação dos instrumentos de medida nunca poderia ser diretamente observada, Schrödinger concluiu que eles não poderiam ter atributos mal determinados. Seu argumento foi o de que, por menores que fossem os domínios de possibilidade dos instrumentos *M* — tão pequenos que não pudessem ser medidos — seria fácil imaginar experiências que dividissem esses diminutos domínios em dois domínios separados, cada um acarretando consequências macroscópicas diversas.

Por exemplo, em nossa experiência da polarização, o domínio de possibilidade de cada fóton *D* é seccionado exatamente ao meio pelo cristal *H/V.* Esse fóton, após passar através do

cristal, se torna uma superposição dos fótons *He V* espacialmente separados. De acordo com as leis do movimento quântico (expandir-se até preencher todas as possibilidades), esse estado evolui até atingir um outro estado em que tanto o contador alto quanto o baixo são sensibilizados, ao mesmo tempo, por um único fóton. Nessa experiência, a indeterminação do mundo microscópico se difunde de maneira tal que abrange toda a aparelhagem: duas grandes peças formadas de fósforo, vidro e metal são submetidas a uma superposição quântica.

A fim de dramatizar o seu argumento, Schrödinger ampliou o seu instrumento de medida para nele incluir um gato. Imaginemos, em suas palavras, um "instrumento diabólico": as saídas dos detectores alto e baixo conduzem a uma caixa fechada onde vive um gato inocente. Se o contador alto dispara, o gato vive; se o baixo dispara, o gato morre. Apenas um fóton entra no aparelho. 0 que acontece ao gato

de Schrödinger?

Considerando que Schrödinger assumiu a premissa de que os objetos macroscópicos possuem atributos inexatamente determinados, as duas trajetórias simultâneas do fóton provocam a sensibilização simultânea dos dois contadores, resultando no disparo de um sinal que tanto é alto quanto baixo, o que torna o gato *tanto vivo quanto morto ao mesmo tempo!*

O domínio do fóton tem apenas a largura de um quantum, mas o cristal de calcita é suficientemente aguçado para dividi-lo em dois domínios. Essa divisão se transfere aos detectores de fótons e, por fim, ao gato de Schrödinger que passará, então, a existir — se a suposição de Schrödinger estiver correta — num estado muito estranho: gato meio morto/gato meio vivo. E, nas palavras de nosso colega Bruce Rosenblum, "Isso não quer dizer que o gato está doente."

A menos que nossa percepção esteja ter-

rivelmente equivocada, é um absurdo atribuir uma tão extravagante forma de existência a um gato ou a um instrumento de medida; ninguém viu jamais uma superposição de instrumentos de medida, um alto e um baixo, quanto mais de gatos, um vivo e um morto, e ninguém verá jamais. Schrödinger conclui que estamos simplesmente errados quando acreditamos que os instrumentos de medida possuem atributos ligeiramente indeterminados. Essa tentativa de solução do problema da medição leva a um beco sem saída.

Em algum lugar entre o cristal e o gato, as regras quânticas tiveram que mudar: os atributos do sistema, antes espalhados, tiveram que juntar-se numa única realidade. O argumento informal de Schrödinger indica o que von Neumann provou, mais rigorosamente, com a sua matemática: se o mundo inteiro é descrito de uma maneira quântico-mecânica, em termos de ondas mandatárias, em algum lugar entre a fon-

te de quons e o resultado final deve necessariamente ocorrer um "colapso da função ondulatória". Se a função ondulatória nunca entrar em colapso, mas se expandir continuamente até preencher todas as possibilidades que lhe estão abertas, a diabólica aparelhagem de Schrödingerr mostra como seria fácil produzir gatos que estão simultaneamente mortos e vivos.

O argumento de Schrödinger contra os atributos mal determinados depende do fato de que, nessa experiência, sabemos antecipadamente (porque cada sinal emitido e impresso é sempre alto ou baixo, nunca alto e baixo) que Q gato estará vivo ou estará morto, mas não vivo e morto. Estamos assumindo que, no que concerne ao seu comportamento macroscópico, um gato não é diferente de uma impressora Embora tenhamos boas razões para acreditar que o gato, nessa experiência, existe sempre num estado de saúde definido, a teoria quântica parece admitir, em princípio, outras experiências em que o

resultado não é tão claro. A barra de safira de Braginski, por exemplo, é maior do que qualquer gato e existe, após os russos terem exercido sua opção métrica em favor do atributo *Xt*, num estado quântico constituído, meio a meio, de ondas de quantidade de movimento e ondas de posição somadas em uma fase definida: uma situação incomum para um objeto "clássico". Talvez nunca tenhamos visto um "gato de Schrödinger" vivo/morto apenas porque não saibamos como procurá-lo.

Numa recente conferência sobre química quântica, o físico Frederik Belinfante, autor de um importante levantamento dos modelos de realidade, do tipo variável oculta, comentou que, se a teoria quântica permitisse a ocorrência de fenômenos tais como o do gato de Schrödinger, poder-se-ia não só matar gatos com máquinas quânticas, mas, também, trazê-los de volta à vida. Previu ainda que a teoria quântica poderá tornar-se um importante ramo da medi-

cina veterinária.

Do que sabemos sobre a teoria quântica, é fácil ver como construir uma máquina para ressuscitar gatos mortos. Tudo o que precisamos fazer é medir precisamente um atributo que seja conjugado do atributo vivo/morto; o princípio da incerteza faz o resto. Comece com um gato em um bem determinado estado de morto. Exerça a sua opção métrica do seguinte modo: faça o gato passar por um filtro que só deixe passar gatos com um bem determinado valor de um atributo denominado "gato diagonal", i.e., um atributo conjugado do atributo vivo/morto. A metade dos gatos (anteriormente mortos) que passam por esse filtro estarão vivos. Se o seu gato ainda estiver morto após a passagem pelo filtro "gato diagonal", faça-o passar novamente. Esse filtro tem uma taxa de somente 50% de curas, mas pode ser utilizado repetidamente.

FASES ALEATÓRIAS PODEM PROVOCAR

O COLAPSO DA FUNÇÃO ONDULATÓRIA?

Na experiência de Schrödinger o fóton segue as duas trajetórias, mas o gato não. Qual será o caráter especial dos objetos macroscópicos que evita a divisão de um gato numa superposição de possibilidades? Alguns físicos acham que é a capacidade das fases de se tornarem aleatórias o que distingue um gato de um fóton. Gatos são, também, entidades quânticas, mas suas fases estão misturadas; a fase de um fóton, por outro lado, é bem disciplinada. Será que o processo do colapso da função ondulatória ocorre sempre que as fases de um sistema se tornam suficientemente aleatórias?

Não é difícil encontrar mecanismos que tornem aleatórias as fases no interior dos instrumentos de medida. Os físicos italianos Antonio Daneri, Angelo Loinger e Giovanni Maria Prosperi mostram que a *termodinâmica dos*

grandes corpos pode tornar aleatórias as fases. O físico russo Dmitri Blokhintsev mostra que o processo de *amplificação,* que torna visível ao olho humano um processo quântico, inevitavelmente torna aleatórias as fases quânticas. Outros culpam o *processo irreversível envolvido na operação de registrar.* Os físicos H. Dieter Zeh e Wojciech H. Zurek mostram que as *interações com o ambiente* estão continuamente tornando aleatórias as fases dos objetos macroscópicos. Na visão desses físicos, gatos e contadores de fótons não se dividem porque o ambiente os está observando continuamente.

Von Neumann provou que se pode colocar o colapso da função ondulatória em qualquer lugar, entre a fonte e o observador, sem que o resultado se altere. Isso significa que o locai do colapso não pode ser determinado com o auxílio da experimentação. Contudo, quando colocamos o colapso muito perto da fonte estaremos deteriorando os resultados de *outras* expe-

riências que poderíamos estar efetuando com o mesmo quon. Se provocamos prematuramente o colapso da função ondulatória, essas outras experiências darão resultados errados; esses resultados nos permitem excluir certos locais para a inserção do colapso.

Por exemplo, suponhamos que, por decisão nossa, o fóton *D* incidente entre em colapso no interior do cristal analisador: ao invés de seguir as duas trajetórias *(V* e *H),* o fóton segue apenas uma delas. Essa localização do colapso é compatível com os resultados — para cada fóton, apenas um símbolo (Alto ou Baixo) é impresso na fita de saída — mas um tal *colapso prematuro* não se adapta a uma outra experiência que podemos fazer para verificar se um fóton segue uma só trajetória ou as duas.

Utilizando espelhos, por exemplo, podemos combinar a luz dos dois canais do cristal e pesquisar a *interferência ondulatória* dos atributos polarização, característica de quons que

estão percorrendo as duas trajetórias. Se virmos essa interferência, ficaremos sabendo que a função ondulatória não entrou, ainda, em colapso. No caso em pauta, quando combinamos os feixes, vemos o efeito da interferência entre os atributos polarização: imediatamente após a passagem pelo cristal, o fóton seguiu, evidentemente, as duas trajetórias.

Sigamos a cadeia de von Neumann um pouco adiante. Será que a função ondulatória entra em colapso quando o fóton excita uma molécula de fósforo? Muitos físicos diriam que não. Após excitada, a molécula de fósforo volta ao seu estado de terra: ela não registra a presença do fóton. Se formos suficientemente espertos, poderemos provocar a interferência da luz proveniente das moléculas alta e baixa de fósforo, e verificar que, quando ultrapassa as moléculas de fósforo, o processo de medição ainda está dividido.

E quanto ao próximo passo da cadeia de

von Neumann? A luz da molécula de fósforo (ainda supostamente dividida em duas possibilidades simultâneas) passa através de um par de lentes focalizadoras. Uma bem conhecida propriedade das lentes e dos espelhos é a de que eles preservam as fases; se não o fizessem, não poderiam formar imagens claras. Assim sendo, não é provável que a função ondulatória entre em colapso nas lentes.

A tela sensível à luz vem, a seguir, na cadeia de von Neumann. Nesse ponto, ocorre a interação da luz com a onda do elétron no cristal de silício, elevando-o a um estado energético mais alto. Como a onda do elétron alto está em um cristal fisicamente diferente daquele em que se encontra a do elétron baixo, fica difícil provocar a interferência. Podemos, contudo, imaginar a mesma experiência utilizando uma única lasca de silício, ao invés de dois detectores separados. Ainda em princípio, poderíamos observar os efeitos da interferência entre as du-

as excitações do elétron no cristal de silício.

Parece que, se formos suficientemente engenhosos, poderemos levar a localização do colapso da função ondulatória até tão perto do observador quanto desejarmos. Porém, esse método experimental depende de que as ondas, em cada trajetória, possuam fases bem definidas.

Esse teste específico do colapso prematuro da função ondulatória está condicionado à capacidade do experimentador para juntar os feixes divididos, a fim de mostrar um padrão de interferência. Porém, no Capítulo 5, vimos que, quando as ondas se somam *com fases aleatórias, o* seu padrão de interferência desaparece. Assim, se as fases se tornam aleatórias em algum lugar ao longo da cadeia, não podemos aplicar esse teste de colapso da função ondulatória. Isso não significa que, uma vez que se tornem aleatórias, as ondas tenham entrado em colapso; significa apenas que esse modo de testar o colapso prematuro não funciona.

Além de dificultar o teste da presença de possibilidades simultâneas, a ocorrência de fases aleatórias traz uma outra consequência que diz respeito à teoria quântica. Essa consequência pode ser entendida se examinarmos o que a presença de fases aleatórias acarreta para as ondas comuns. Vimos, no Capítulo 5, que ondas comuns adicionadas, com fases definidas, não conservam a energia (quadrado da amplitude) em todas as regiões, apresentando regiões com excesso local de energia e regiões com déficit local de energia. Porém, quando as ondas se tornam aleatórias, a energia é conservada em todas as regiões: a energia de um feixe se soma à de outro feixe segundo a aritmética comum.

O mesmo acontece com as ondas quânticas quando se tornam aleatórias, mas aqui a *probabilidade* (quadrado da amplitude quântica) toma o lugar da energia das ondas comuns. Ondas quânticas adicionadas, com fases definidas, não conservam a probabilidade em todas as re-

giões, apresentando regiões com excesso local de probabilidade e regiões com déficit local de probabilidade (interferência de atributos). No entanto, quando essas ondas se tornam aleatórias, a probabilidade é conservada em todas as regiões: a probabilidade de um feixe se soma à do outro feixe, segundo a aritmética comum. Em outras palavras, quando a fase de uma onda quântica se torna aleatória, as probabilidades que lhe são correspondentes combinam de modo exatamente igual ao das possibilidades clássicas de um jogo de dados.

Esse importante fato de que, uma vez que a fase se tenha tornado aleatória, as probabilidades quânticas se comportam, *numericamente,* como as probabilidades clássicas, é utilizado por alguns físicos para afirmar que as probabilidades quânticas e clássicas são *conceituai mente* as mesmas, desde que a fase se tenha tornado aleatória. Ou seja, eles afirmam que a eventualidade da fase ser tornada aleató-

ria é suficiente para provocar o colapso da função ondulatória e converter uma situação em que o quon segue as duas trajetórias (ignorância quântica) em uma situação em que ele segue apenas uma (ignorância clássica).

Embora a fase tornada aleatória possa certamente embaralhar as trajetórias, é difícil figurar o modo pelo qual ela possa destruí- las; a lei do domínio garante que as possibilidades de um quon nunca podem ser reduzidas a um valor inferior a um quantum de ação. Assim como nenhuma graduação de mistura poderá transformar areia branca e areia preta em areia cinza, nenhum grau de im- previsibilidade da fase poderá transformar duas trajetórias numa só trajetória. Quando se olha de perto as afirmações de que a eventualidade da fase ser tornada aleatória provoca, por si só, o colapso da função ondulatória, sempre se tem a impressão de que o colapso — a transição conceituai da ignorância quântica para a ignorância clássica —

teve que ser inserido "manualmente". Embora a eventualidade de que a fase possa ser tornada aleatória tenha o poder de turvar as águas, ela não pode esconder o fato de que existe, na análise, um ponto onde simplesmente admitimos que "então acontece um milagre". O embaralhamento das fases quânticas parece ser uma condição necessária, mas não suficiente, para o colapso da função ondulatória.

Embora a eventualidade de que a fase se torne aleatória possa destruir alguns aspectos do comportamento da onda, fazendo-a imitar, até certo ponto, o comportamento da probabilidade clássica, outros aspectos do comportamento ondulatório são imunes aos seus efeitos. Vimos, por exemplo, no Capítulo 5, que, quando o padrão de Airy se tornava aleatório, a interferência era destruída, mas a difração sobrevivia. O código de área espectral (princípio da incerteza de Heisenberg) é outra propriedade ondulatória que permanece válida, quer as fa-

ses estejam ordenadas ou não. Talvez existam outras propriedades inatas das ondas, a serem ainda descobertas, que sobrevivam à eventualidade de que as fases se tornem aleatórias, e cujas correspondentes quânticas nos possam ajudar a penetrar mais profundamente no mistério do *colapso da função ondulatória* — onde o estranho mundo do quantum silenciosamente se transforma no mundo da vida de todos os dias.

APÊNDICE: CALCITA, UM CRISTAL QUE SECCIONA OS FÓTONS

Nos tempos de Newton, um marinheiro descobriu, na Islândia, um mineral transparente dotado de notáveis propriedades óticas. O espato-de-islândia, mais conhecido como calcita, é birrefringente: ele divide a luz em duas trajetórias diferentes, dependendo da sua polarização.

Essa sensibilidade à luz polarizada faz supor que a misteriosa pedra de navegação, men-

cionada nas sagas islandesas, possa ter sido uma variedade da calcita. Como instrumento de orientação, a magnetita seria de pouca utilidade em regiões tão próximas do pólo magnético da Terra. Nessas altas latitudes, os marinheiros provavelmente se guiavam pelas estrelas e pelo sol. Porém, durante os longos crepúsculos do verão, o sol muitas vezes desaparece abaixo do horizonte. Considerando que a luz proveniente do céu está parcialmente polarizada segundo um determinado padrão centrado no solo, os *vikings* poderiam fixar a direção do sol, no mar, observando a polarização da luz vinda do alto, através de um cristal de calcita. Embora nunca venhamos a saber com certeza, talvez esse cristal, tão útil na moderna pesquisa da realidade, pode, há muito tempo, ter ajudado os nórdicos a descobrir a América.

Quando um raio de luz entra num cristal de calcita, dois raios saem do outro lado. Um desses raios é denominado *raio comum,* porque

obedece às leis convencionais da ótica. Essas leis dizem, por exemplo, que um raio de luz, incidindo de frente numa superfície transparente, não se inclina. O segundo raio da calcita é denominado *raio incomum,* porque faz pouco caso desses regulamentos óticos. Por exemplo, quando a luz incide de frente na calcita, o raio comum segue direto, mas o incomum se inclina.

Esse estranho comportamento esquizofrênico da luz, na calcita, desafiou os melhores intelectuais do século XVII. O físico holandês Christian Huygens deu a primeira explanação científica sobre esse extraordinário cristal. Huygens analisou a luz da calcita dividindo-a, conceitualmente, em pequenas ondas esféricas — uma técnica que, três séculos mais tarde, inspirou a versão de Feynman da teoria quântica baseada na adição de histórias.

A chave do comportamento da calcita é o seu eixo ótico — uma direção especial, indi-

cada por uma seta na Fig. 8.1, que atravessa o cristal. A luz polarizada paralelamente a esse eixo passa normalmente através do cristal. A luz polarizada em ângulo reto com esse eixo é desviada para outro caminho — o caminho incomum. Quando o eixo ótico está orientado verticalmente, os fótons verticalmente polarizados tomam a trajetória comum (alta); os fótons horizontalmente polarizados seguem o caminho incomum (baixo).

Do ponto de vista moderno, a calcita secciona a luz em dois raios porque a sua estrutura cristalina é sensível à diferença entre as formas ondulatórias quânticas associadas ao atributo polarização. De acordo com a teoria quântica, o cristal de calcita é uma janela que se abre para o microcosmo: seu feixe duplo é uma indicação de que o atributo polarização de um fóton possui um duplo valor.

9. Quatro Realidades Quânticas

> A física começa na experiência de todos os dias, à qual dá continuidade de modo mais penetrante, conservando a irmandade que as liga, e não a transcende genericamente; ela não pode penetrar em outros domínios. As descobertas da física não têm em si mesmas — assim creio — o poder de nos forçar a interromper o hábito de figurar o mundo físico como uma realidade.
> Erwin Schrödinger

A teoria quântica age como um encantamento; ela prevê corretamente todos os fatos quânticos que podemos medir e muitos outros que não podemos (como a temperatura no interior do sol), ou não nos interessa medir (como o "atributo piano" do elétron, por exemplo). Essa teoria tem

obtido sucesso em todos os testes que o engenho humano pôde inventar, até a última casa decimal. No entanto, como um mágico que tivesse herdado uma vara de condão maravilhosa, que sempre age sem que ele saiba como, o físico se perde quando tenta explicar o assombroso sucesso da teoria quântica.

O que significa "explicar" uma teoria? Imaginemos o que se gostaria de saber sobre a vara de condão, isto é, a realidade oculta, responsável pelo seu poder mágico. A teoria quântica é mais do que uma afortunada dádiva caída do céu; o inaudito poder previsivo dessa teoria indica que ela faz contato com alguns aspectos reais do mundo físico. Uma "explicação" da teoria quântica nos informaria sobre o tipo de mundo em que vivemos, cujos movimentos podem ser profetizados, com precisão de detalhes, por uma curiosa técnica matemático-ondulatória.

A teoria quântica se assemelha a uma pri-

morosa torre cujos andares intermediários estão prontos e ocupados. A maior parte dos construtores está concentrada no topo, fazendo planos e criando formas para os novos andares. Entrementes, as fundações do edifício consistem dos mesmos andaimes provisórios montados para dar início ao projeto. Embora precise passar por elas para chegar à cidade, o físico comum evita esses andares inferiores com uma espécie de medo supersticioso. Daniel Greenberger, professor da Universidade de Nova Iorque, falando numa recente *Festschrift*, especulou sobre a razão pela qual a maioria dos físicos evita a questão da realidade quântica:

"Esse súbito sucesso em grande escala, após os desesperados esforços de toda uma geração de grandes intelectos, comunica uma heroica e até mesmo mítica qualidade à história da [teoria quântica]. Porém, inevitavelmente, também provoca nos físicos uma sensibilidade, uma espécie de postura defensiva, originadas

em última análise no receio de que toda aquela delicada estrutura, erigida com tão penoso esforço, possa se desmoronar a um simples toque. Isso fez nascer uma atitude do tipo 'deixemos as coisas como estão', que, na minha opinião, contribui para a forte relutância da maioria dos físicos em remexer ou mesmo analisar criticamente os fundamentos da teoria quântica. Contudo, cinquenta anos já passaram, e a estrutura parece mais sólida do que nunca."

A crise de realidade dos físicos consiste no fato de que ninguém concorda sobre o que está mantendo de pé a estrutura. Pessoas diferentes, examinando a mesma teoria, produzem modelos de realidade profundamente diferentes, todos eles sobrenaturais quando comparados à experiência comum que constitui tanto a vida diária quanto os fatos quânticos. Os físicos discordam sobre as partes da teoria que devem ser levadas a sério e aquelas que deverão ser ignoradas, por constituírem formalismo va-

zio sem contrapartida no mundo real. A nossa escolha dentre as diferentes imagens da realidade quântica irá depender das partes da teoria quântica que decidirmos levar a sério. Neste capítulo, e no próximo, veremos como as oito principais realidades quânticas se originam da ênfase seletiva emprestada a certos aspectos da teoria quântica, e do abandono de outros.

Realidade Quântica # 1: A interpretação de Copenhague, Parte I. (Não existe nenhuma realidade profunda.) A interpretação de Copenhague, desenvolvida principalmente por Bohr e Heisenberg, é a imagem a que a maioria dos físicos recorre quando perguntamos o que significa a teoria quântica. Os copenhaguenistas não negam a existência dos elétrons, e sim a noção de que essas entidades possuem atributos dinâmicos próprios. Embora o elétron *medido* sempre apresente um determinado valor para a sua quantidade de movimento, será um er-

ro, segundo Bohr, pensar que *antes* da medição esse elétron possuía uma quantidade de mqvimento determinada. Os copenhaguenistas acreditam que, quando não está sendo medido, o elétron não possui quaisquer atributos dinâmicos determinados.

A teoria quântica foi desenvolvida quase que somente por europeus. J. Robert Oppenheimer, um dos poucos americanos que participaram do Instituto de Copenhague, de Bohr, nega explicitamente a existência dos principais atributos que a física clássica utiliza para descrever o movimento externo de uma partícula: "Quando nos perguntam, por exemplo, se a posição do elétron permanece a mesma, devemos dizer que 'não'; quando nos perguntam se a posição do elétron se altera com o tempo, devemos dizer que 'não'; quando nos perguntam se o elétron está em repouso, devemos dizer que 'não'; quando nos perguntam se ele está em movimento, devemos dizer que 'não'."

Alguns físicos confundem a doutrina de Copenhague com uma interpretação pragmática da teoria quântica. O pragmatista vê qualquer teoria como uma mera máquina matemática de gerar números que ele, em seguida, compara com a experiência. Um pragmatista se preocupa com resultados, não com a realidade. O pragmatista se recusa, por uma questão de princípio, a especular sobre a realidade profunda, pois que, do seu ponto de vista, um tal conceito não possui significação. O pragmatismo é uma filosofia intelectualmente segura, mas, em última análise, estéril.

Um pragmatista, por princípio, se recusaria a comentar o status existencial dos atributos de um quon não medido. Esses alunos de Bohr não são absolutamente tímidos pragmatistas! Os copenhaguenistas não afirmam que tais atributos não têm significação, mas que são inexistentes. Eles baseiam suas conclusões a respeito de uma invisível realidade quântica não em

algum princípio filosófico abstrato aplicável a todos os casos, mas na estrutura específica da própria teoria quântica. Algumas teorias deste mundo (a mecânica newtoniana, por exemplo) deixam ao nosso critério acreditar ou não que entidades não observadas possuem seus próprios atributos. A teoria quântica, de acordo com os seguidores de Bohr, não nos concede essa opção.

Os copenhaguenistas adotam como indicação central para a natureza do mundo quântico o princípio da incerteza, que limita a capacidade humana de sondar o microcosmo. O princípio da incerteza é mais do que uma irredutível indeterminação que existe "lá fora". Ele parece estar intimamente vinculado ao processo da medição. Não existe nenhum atributo, por exemplo, que seja intrinsecamente indeterminado; qualquer atributo, à nossa escolha, pode ser medido com absoluta precisão. Contudo, a nossa escolha do atributo que vai ser medido

com precisão torna máxima a indeterminação dos atributos conjugados. A incerteza quântica não está vinculada a um determinado atributo, mas passa de um atributo para outro à medida que mudamos de opinião sobre o que medir.

Nos primórdios da teoria quântica, essa incerteza dependente da medição foi atribuída a uma inevitável perturbação do sistema quântico causada pelo ato de medir — uma perturbação que não podia ser minimizada (porque a constante de Planck impõe uma interação mínima), nem calculada (devido ao caráter aleatório quântico). Contudo, a escorregadia e mutável indeterminação dos atributos conjugados era demasiadamente sistemática para ser explicada através de simples modelos de medição quântica perturbadora.

Um segundo argumento contra o modelo de medição perturbadora é a existência de medições no estilo Renninger — medições em que as informações sobre um sistema são obtidas

através da *ausência de um evento detector.* O físico alemão Mauritius Renninger foi o primeiro a apontar a possibilidade de se obter informação através da observação de que "nada acontece".

Como exemplo de medição no estilo de Renninger, consideremos um sistema quântico que possua apenas duas possibilidades — por exemplo, a luz de uma estrela distante que pode ser refletida no espelho A, ou no espelho B, de um interferômetro estelar. Suponhamos que sabemos que um fóton está a caminho dos espelhos, mas que não sabemos qual a trajetória que ele tomará. Colocamos um detector na trajetória A e ele não sinaliza. A ausência de sinal na trajetória A indica que o fóton tomou a trajetória B. Fizemos a medida da posição de um fóton sem agir explicitamente sobre ele. Renninger e outros físicos examinaram cuidadosamente essas medições nulas e descobriram, para sua surpresa, que elas são equivalentes, sob

todos os aspectos, às medições em que algo, de fato, acontece — isto é, nos termos de von Neumann elas "provocam o colapso da função ondulatória", bem como aumentam a incerteza do atributo conjugado.

No modelo de perturbação, um elétron possui, realmente, atributos que são imprevisivelmente alterados pelo instrumento de medida. O que acontece numa medição quântica não é assim tão simples, segundo a escola de Copenhague. A explicação de Bohr para a indeterminação dos atributos quânticos é a de que esses atributos não pertencem propriamente ao quon, mas que estão "numa situação global de medição" — uma frase preferida de Bohr. Quando medimos um certo atributo, não devemos pensar que o elétron realmente possui esse atributo. Os elétrons não possuem quaisquer atributos próprios. Os assim chamados atributos do elétron são realmente relações entre o elétron e o aparelho de medição, e não pertencem propri-

amente a nenhum dos dois.

A noção de Bohr, de uma *realidade relacional* explica por que a incerteza de um atributo depende do tipo da medição efetuada e por que os atributos são afetados por medições do tipo não perturbador, como as técnicas de Renninger. Se os "atributos" do elétron residem na ***relação*** entre o quon e o instrumento *M,* podese influenciar o atributo através de uma simples alteração do instrumento.

O suporte para o conceito de realidade relacionai de Bohr vem da própria maneira pela qual a teoria quântica funciona. Uma medição quântica corresponde à análise de uma determinada forma ondulatória, dividindo-a em membros de uma certa família de formas ondulatórias — ondas de tuba ou de piano, por exemplo. Cada família de formas ondulatórias representa um determinado atributo quântico. A questão é a seguinte: os atributos desse tipo pertencem, de fato, ao quon em questão, ou perten-

cem parcialmente ao instrumento M — por exemplo, ao prisma analisador?

Gravemos numa fita, durante alguns minutos, o ruído do tráfego. Se fizermos a análise desse ruído decompondo-o em formas ondulatórias da tuba, poderíamos dizer que, num certo sentido, o ruído do tráfego é equivalente ao som de um conjunto de tubas.
Mas poderíamos, igualmente, dizer que se trata de um conjunto de pianos ou de saxofones. Há um sentido em que o ruído é feito de formas ondulatórias como essas. Sabemos, contudo, que o ruído real do tráfego não possui qualidades intrínsecas da tuba, do piano, ou do saxofone. Esses sons musicais derivam muito mais do analisador do que do ruído em si.

O mesmo acontece com as entidades quânticas, segundo Bohr. Os elétrons não possuem posição, quantidade de movimento, ou qualquer outro atributo dinâmico. Os assim chamados atributos não são propriedades intrínsecas

dos sistemas quânticos, mas manifestações da "situação experimental global". Não tem sentido falar dos atributos dinâmicos do elétron em si. Esses "atributos" surgem apenas de um contexto especial de medição e se alteram quando o contexto se altera. Segundo Bohr, "Partículas materiais isoladas são abstrações, e suas propriedades somente são determináveis e observáveis através de suas interações com outros sistemas."

Um aspecto óbvio do mundo comum é o de que ele parece ser constituído de objetos. Um objeto é uma entidade que apresenta imagens diversas sob diferentes pontos de vista e para sentidos diferentes, porém todas essas imagens podem ser consideradas como produzidas a partir de um só motivo central. Ninguém vê (cheira, sente) a mesma maçã subjetiva, mas todos admitem que existe uma maçã objetiva que é a fonte dessas diversas sensações. Sua divisão em objetos é a mais importante caracterís-

tica do mundo do dia-a-dia. Mas a situação é outra, no mundo quântico (que é, afinal, nada mais que o mundo comum minuciosamente observado).

As imagens distintas que formamos do mundo quântico (ondas, partículas, por exemplo), partindo de diferentes pontos de vista experimentais, não se juntam num todo compreensível. Não existe uma imagem isolada que corresponda a um elétron. O mundo quântico não é feito de objetos. Como diz Heisenberg: "Átomos não são coisas."

Isso não significa que o mundo quântico é subjetivo. O mundo quântico é tão objetivo quanto o nosso: pessoas diferentes, adotando o mesmo ponto de vista, veem a mesma coisa, mas o mundo quântico não é feito de objetos (pontos de vista diferentes não se somam). O mundo quântico é objetivo, porém destituído de objetos.

Um exemplo de fenômeno que é objetivo

mas não constitui um objeto é o arco-íris. O arco-íris não tem fim (donde se conclui que não há nenhum pote de ouro) porque o arco-íris não é uma "coisa". O arco-íris aparece em um lugar diferente para cada observador — na verdade, cada um dos nossos olhos vê um arco-íris ligeiramente diferente. Contudo, o arco-íris é um fenômeno objetivo; ele pode ser fotografado.

Para Bohr, a hora da realidade profunda — dos atributos "reais" que um elétron possui independentemente da observação — é tão sem sentido quanto procurar o fim do arco-íris. Os atributos de um elétron não pertencem ao elétron em si, mas constituem um tipo de ilusão produzida pelo elétron e pelo "arranjo experimental global". Gostamos de imaginar que, embora o arco-íris não seja um objeto, ele é realmente feito de objetos, i.e., uma ilusão formada pela luz solar e pela chuva, que não são ilusórias. Do mesmo modo, precisamos de fatos concretos para construir os atributos ilusóri-

os do elétron. Na interpretação de Copenhague, o "fato concreto" final é o instrumento de medida em si. De maneira óbvia, as telas de fósforo são feitas de elétrons; os copenhaguenistas contrapõem dizendo que, de uma maneira menos óbvia, os elétrons são também feitos de telas de fósforo.

Na interpretação de Copenhague existe um sentimento de que o mundo não é feito de átomos, mas de instrumentos *M.* O físico Henry Stapp, de Berkeley, faz o seguinte comentário sobre essa estranha inversão da ordem da realidade:

"Os cientistas dos últimos anos da década de 20, liderados por Bohr e Heisenberg, propuseram uma conceituação da natureza radicalmente diferente da adotada pelos seus predecessores... Sua estrutura teórica não se estende para baixo, até se ancorar nas realidades microscópicas fundamentais do espaço-tempo. Ao contrário, ela voltou atrás e se ancorou na

concreta realidade dos sentidos que forma a base da vida social. Esse conceito radical, denominado interpretação de Copenhague foi, a princípio, cruamente criticado, mas tornou-se, na década de 30, a interpretação ortodoxa da teoria quântica, oficialmente adotada em quase todos os livros didáticos e pelos experimentalistas que atuavam nessa área."

Bohr trata de maneira especial os instrumentos *M.* Ele não representa um instrumento *M* por uma onda de possibilidade; ao contrário, considera-o uma realidade concreta. Mediante a concretização do instrumento M, ele pode justificar o "caráter comum" do fato quântico e evitar monstruosidades como o gato vivo/morto de Schrödinger que derivam de se acreditar que as mesmas regras quânticas são válidas para gatos e elétrons. Durante toda a sua carreira, Bohr enfatizou o "estilo clássico" de existência dos objetos comuns. Por exemplo:

"Mesmo quando os fenômenos transcen-

dem o escopo das teorias físicas clássicas, a descrição do arranjo experimental e o registro das observações devem ser feitos em linguagem simples, adequadamente suplementada pela terminologia técnica."

Bohr reconhece que a *forma* de todos os fatos quânticos é idêntica à forma de todos os fatos pré-quânticos, isto é, nada tem de especial. Um fato imutável da vida é o de que a nossa experiência direta de um elétron (o clarão numa tela) não é mais misteriosa que a nossa experiência de gatos e arco-íris.

Mas como pode o instrumento de medida fugir às regras quânticas que são válidas pará todas as entidades do mundo? Penso que Bohr responderia a essa pergunta dizendo que, se o instrumento *M* se tornasse o objeto da medição, ele certamente teria que obedecer às regras quânticas, mas então o instrumento *M* # 2 deveria residir em um mundo de estilo clássico.

No entanto, poderíamos imaginar um ter-

ceiro instrumento *M*, que medisse o instrumento # 2. Então, o instrumento # 2 precisaria ser representado por uma onda de possibilidade e obedeceria aos princípios da superposição e da incerteza, mas o instrumento # 3 residiría no mundo clássico. Essa procissão infinita de instrumentos de medida medindo-se uns aos outros é denominada "paradoxo de von Neumann do retrocesso infinito". O paradoxo de von Neumann resulta da admissão de entidades especiais não quânticas — os instrumentos de medida — quando sabemos que tais instrumentos não podem realmente ser especiais.

Um dos inconvenientes da visão copenhaguenista é que ela confere um papel privilegiado aos instrumentos de medida, descrevendo-os em termos de realidades definitivas, enquanto que todas as outras entidades são representadas por superposições de possibilidades. O mundo, em si, certamente não está dividido desse modo, mas consiste, ao contrário, de uma

só realidade. Outra fraqueza conceitual da interpretação de Copenhague é que, em última instância, ela considera tanto o instrumento *M* quanto a medição como não passíveis de análise. Desse modo, na visão copenhaguenista, a teoria quântica pode explicar com grande exatidão o comportamento de átomos, mas é impotente para lidar com os atributos de gatos e maçãs quando desempenham os seus papéis de partes não analisadas "da situação experimental global".

Realidade Quântica # 2: A interpretação de Copenhague, Parte II. (A realidade é criada pela observação.) Expandindo o papel especial desempenhado pelos instrumentos ***M*** na interpretação de Copenhague, a Realidade Quântica # 2 enfatiza o status especial do observador num mundo quântico. Dentre os muitos elementos da teoria quântica, a escola da realidade criada pelo observador dá ênfase à opção métri-

ca quântica — a capacidade do observador para intervir na realidade mediante a livre escolha do atributo que quer examinar. Na linguagem ondulatória, a opção métrica se soma à liberdade de escolha do alfabeto de formas ondulatórias em que a onda mandatária da entidade será expressa: por exemplo, se o ruído do tráfego será feito de ondas de tuba, de piano ou do que for. Dizem os crentes da realidade criada pelo observador que, quando se escolhe os atributos que se quer encontrar, faz-se a escolha dos atributos que um sistema parecerá possuir.

O professor John Archibald Wheeler transformou o Instituto de Física Teórica, em Austin, Texas, no mais importante centro de pesquisa da realidade quântica do mundo — uma espécie de segunda Copenhague, localizada naquele estado norte-americano. Wheeler tem, por várias vezes, defendido realidades quânticas diversas, porém, nenhuma tão firmemente quanto a realidade criada pelo observador. "Ne-

nhum fenômeno elementar é um fenômeno real enquanto não for um fenômeno observado", afirma Wheeler. Talvez essa realidade quântica devesse ser chamada de "interpretação de Austin da teoria quântica" em homenagem ao instituto de Wheeler.

Se admitimos que fenômenos comuns como o arco-íris são criados pelo observador, não deveríamos nos surpreender com afirmações semelhantes em favor do elétron. Um elétron, afinal de contas, é certamente mais estranho do que um arco-íris. Wheeler leva a realidade criada pelo observador um passo adiante do arco-íris com o que ele chama de "experiência da escolha retardada".

Nessa experiência, o observador cria não somente os atributos atuais das entidades quânticas, mas também atributos que essas entidades possuíram num passado distante, e que, segundo o pensamento convencional, existiam muito antes do momento em que a experiência foi

concebida, para não se dizer do momento em que foi efetuada. O conceito de uma experiência de escolha retardada é melhor ilustrado por uma das experiências imaginadas por Wheeler: o interferômetro de lente de gravidade. De acordo com Einstein, a gravidade é uma curvatura do espaço-tempo que aparece, por exemplo, no desvio de um raio de luz estelar que passa rente ao sol. Quanto maior for a massa de um objeto, mais ela curva o espaço-tempo e, consequentemente, maior é o desvio do raio luminoso. Considerando que uma galáxia típica contém algumas centenas de bilhões de sóis, sua capacidade de desviar a luz é apreciável.

Um quasar é uma fonte intensa de luz de origem controversa que se formou logo após a criação do universo. Recentemente, os astrônomos detectaram imagens duplas do quasar QSO 0957 + 561, causadas, segundo os cálculos efetuados, pelo desvio de sua luz provocado por uma galáxia que, por acaso, se en-

contra precisamente entre o quasar e a Terra. A luz do quasar que passa à esquerda da galáxia é desviada e se encontra com a luz do quasar que veio pela direita da galáxia. Esses raios de luz convergem para um foco (às vezes mais de um foco, o que explica a imagem dupla) exatamente como a luz que passa pela lente de uma máquina fotográfica. Neste caso, a lente é formada, não de vidro, mas pela curvatura do espaço-tempo induzida pela galáxia. Essa câmera galáctica seria uma grande-angular com uma abertura de milhares de anos- luz.

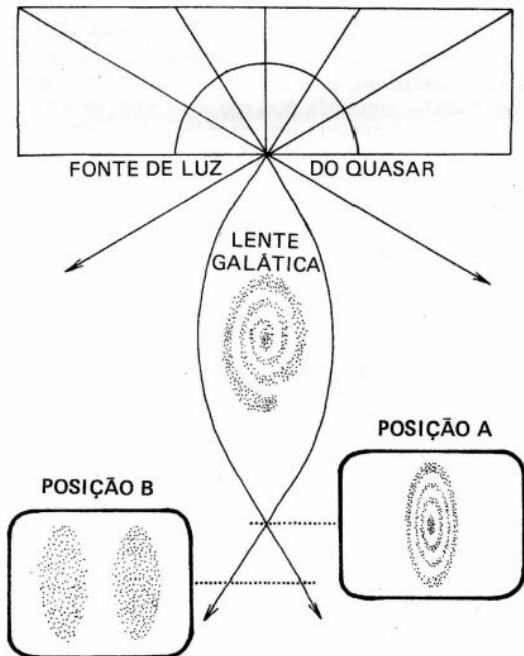



Fig. 9.1. Interferômetro de lente galática — exemplo de uma experiência de "escolha retardada". Dependendo do local onde o experimentador, na Terra, colocar a sua tela de fósforo, em A ou em B, ele aparentemente pode fazer o fóton seguir uma só trajetória contornando a galáxia (opção B), ou as duas (opção A), alterando agora uma condição que, segundo o pensamento convencional, pareceria ter sido acertada há bilhões de anos.

As lentes gravitacionais são interessantes em sua área própria, mas Wheeler utiliza-as para ilustrar uma característica curiosa da teoria quântica. Podemos examinar essa luz do quasar, curvada pela galáxia, fóton a fóton, e indagar se um determinado fóton tomou a trajetória da direita, a da esquerda, ou ambas simultaneamente. Qualquer que seja a resposta, a questão deverá estar decidida há muito tempo; o que estamos vendo é uma luz com dez bilhões de anos de idade, uma luz que partiu do quasar quando o nosso sol ainda não tinha começado a brilhar. Wheeler argumenta, contudo, que, dependendo do que escolhemos para medir agora, parece estarmos capacitados para induzir o fóton a tomar, num passado longínquo, uma das trajetórias ou ambas

Vejamos como se faz para mudar o passado: utilizando a ótica convencional, juntemos os dois raios que passaram à direita e à esquerda da galáxia focalizadora e façamos com que

se cruzem.

Em seguida, decidamos (opção métrica quântica) onde colocar a tela de fósforo sensível aos fótons, se na interseção A ou numa posição B, mais adiante, após os raios terem se separado. Para cada fóton podemos tomar uma dessas duas opções de medição, mas não as duas. Se escolhemos a posição A, observaremos o efeito da interferência ondulatória, indicando que o fóton seguiu as duas trajetórias, e é até possível estimar o atraso relativo correspondente às duas trajetórias com base na forma do padrão de interferência.

Por outro lado, se pusermos a tela de fósforo na posição B, veremos que cada fóton toma somente uma trajetória, à direita ou à esquerda da lente galáctica. Em nossa mente, podemos figurar esse fóton em particular viajando solitário durante milênios, porque hoje decidimos fazer a experiência B e não a experiência A. Podemos fazer o fóton seguinte tomar as duas tra-

jetórias, fazendo rapidamente a outra opção de medida. Pelo que decidimos olhar hoje, parecemos estar capacitados para alterar o atributo de um fóton adquirido bilhões de anos antes de nascermos.

A experiência da escolha retardada de Wheeler parece mostrar que o passado não é imutável, mas se altera de acordo com as decisões tomadas no presente. O popular filósofo Alan Watts diz que certas filosofias orientais chegaram a uma conclusão semelhante, relativa ao poder criativo do tempo presente: "O instante da criação do mundo não está situado num passado inimaginavelmente remoto, mas no agora eterno".

Note-se que nossa capacidade de mudar o passado é limitada. Podemos, de fato, decidir se cada entidade quântica se torna um fóton de uma trajetória ou de duas trajetórias, mas não podemos decidir onde o fóton de duas trajetórias irá se localizar no padrão de interferência,

ou qual a trajetória que o fóton de uma trajetória irá seguir. Esses detalhes estão completamente fora do controle ou do poder de previsão de qualquer um de nós; dizemos que são "quântico aleatórios". As realidades criadas pelo observador com base na opção métrica (primeiro tipo de criação pelo observador) podem selecionar o tipo de atributo que um quon irá possuir, mas não o *valor do tributo.*

Os atributos de fótons e elétrons podem muito bem ser criados, mas o que dizer dos atributos de laranjas ou maçãs? Alguns adeptos da realidade criada pelo observador, invocando argumentos semelhantes aos de Schrödinger em favor do seu gato, acreditam que somente as entidades quânticas tais como elétrons e fótons possuem atributos que podem ser moldados pelo observador. Wheeler, por exemplo, ressalta que somente os *fenômenos elementares* são irreais até que sejam observados. Presumidamente, os atributos de fenômenos não elemen-

tares, como gatos e maçãs, são reais quer estejamos, ou não, olhando para eles. No entanto, é difícil estabelecer uma nítida linha divisória entre as entidades clássicas e as quânticas. Outros físicos que creem na realidade criada pelo observador não estabelecem essa linha; por exemplo, N. David Mermin, de Cornell, acredita que os atributos de todas as entidades — gatos, laranjas, arco-íris e até a lua e as estrelas — não são reais até que alguém olhe para elas, sob os auspícios de uma opção métrica especial.

Além de discordarem sobre quais as entidades que podem ser beneficiadas pela observação, os partidários da realidade criada pelo observador não concordam sobre o que conta como observação. A teoria quântica não diz o que é nem o que não é uma medição, mas nos diz que se descobrirmos como fazer uma medição, ela preverá os resultados. Felizmente, já sabíamos como se faz medições antes do advento da teoria quântica.

Wheeler e muitos dos seus colegas concluíram que a essência da medição é a feitura de um registro. Na opinião deles, um contador Geiger ou um filme Polaroid (auto revelável) são competentes para agirem como observadores, conferindo atributos, através da opção métrica, às entidades observadas agora e sempre para trás no passado.

Alguns cientistas acham que máquinas que fazem registros não são suficientes para caracterizar uma medição, e que somente uma *observação consciente* tem validade como medição (segundo tipo de criação pelo observador). Até os observadores conscientes entrarem em cena, o universo existia em um estado indefinido, incapaz de decidir sobre os atributos que possuía, quanto mais sobre os valores particulares desses atributos. Grandes porções do universo (tudo o que não está sendo olhado neste preciso momento por um observador consciente) permanecem nessa situação vacilante, espe-

rando por um observador consciente que lhes confira um estilo mais definido de existência.

O bispo Berkeley ensinava que a matéria possui realidade somente na medida em que é percebida por alguma mente. Nenhum crente da realidade criada pelo observador, mesmo os mais extremistas, vai tão longe quanto Berkeley. Todos os físicos sustentam a existência absoluta da matéria — elétrons, fótons, etc. — bem como de certos atributos estáticos da matéria. No entanto os físicos da realidade criada pelo observador acreditam firmemente que os *atributos dinâmicos* — posição e quantidade de movimento, por exemplo — não existem, a menos que estejam, de fato, sendo observados. Os elétrons certamente existem — com a mesma massa e carga, quer estejam, ou não, sendo observados — mas é um erro imaginá-los em uma localização particular ou se deslocando numa direção particular a menos que, por acaso, se veja um deles numa dessas situações.

Realidade Quântica # 3: A realidade é um todo indiviso. 0 ponto de vista sustentado por David Bohm e outros, de que, a despeito de suas separações óbvias, o mundo é um todo sem divisões, está relacionado à noção de Bohr de que os atributos quânticos não estão localizados no quon propriamente, mas residem (como o atributo posição do arco-íris) no "arranjo experimental global". Certos aspectos da teoria quântica indicam que essa inocente expressão, "arranjo experimental global", deverá, talvez, incluir não apenas as atividades desenvolvidas na vizinhança imediata do detector de quons, mas também ações arbitrariamente remotas no tempo e no espaço. Todo o universo pode estar envolvido em uma simples medição de um quon isolado, na seleção dos seus atributos observados.

A base para essa afirmação a respeito do todo indiviso tem raízes num aspecto curioso da teoria quântica, denominado "embaralhamen-

to de fases". Todos os quebra-cabeças anteriormente mencionados estavam relacionados ao processo pelo qual *um quon isolado* adquire seus atributos. O conceito de "embaralhamento de fases" surge quando consideramos o modo pelo qual *dois ou mais quons, agindo uns sobre os outros,* adquirem seus atributos.

Sempre que dois quons se encontram, o mesmo acontece com suas ondas mandatárias. Sua união, enquanto perdurar, será representada por uma fusão de ondas mandatárias. A separação desses quons é representada por uma separação de amplitudes de ondas mandatárias, mas as fases dos dois quons não se separam. Pelo contrário, essas fases se tornam embaralhadas de tal modo que os efeitos da interferência no quon A dependem instantaneamente da situação do quon B.

A razão pela qual as ondas quânticas sofrem o embaralhamento de fases, e as ondas comuns não, está no fato de que as ondas quân-

ticas não residem no espaço tridimensional comum, mas no chamado *espaço de configurações.* A diferença entre um par de ondas que reside no espaço comum e outro que reside no espaço de configurações está ilustrada na Fig. 9.3. Para maior clareza, imaginemos que as duas ondas são unidimensionais, como ondas em uma corda. No espaço comum, vemos duas ondas, A e B, se deslocando na mesma corda unidimensional. A mesma situação, representada no espaço de configurações, se assemelha a uma onda em duas dimensões: as ondas A e B não são duas formas ondulatórias separadas, e sim aspectos diferentes de uma mesma forma ondulatória.

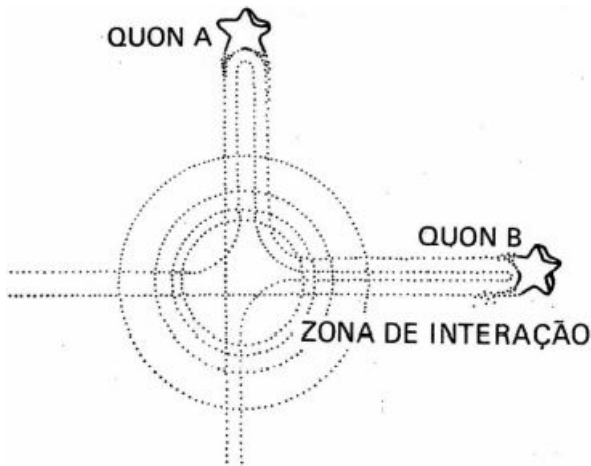



Fig. 9.2. Embaralhamento de fases. Quando dois quons se encontram e, em seguida, se separam, as suas amplitudes se desvinculam, mas não as suas fases. Tudo o que se refere às fases do quon A dependem da situação do quon B, e vice-versa. O embaralhamento de fases mistura as fases internas de A e de B, bem como as relações de fases entre A e B.

O espaço de configurações consiste de *três dimensões para cada quon.* Assim, a onda mandatária do átomo de hidrogênio, composto de dois quons (elétron + próton), reside num

espaço de seis dimensões. A principal razão por que os físicos consideram fictícia a onda mandatária é o fato de que essas ondas se movem num espaço com mais dimensões do que o nosso.

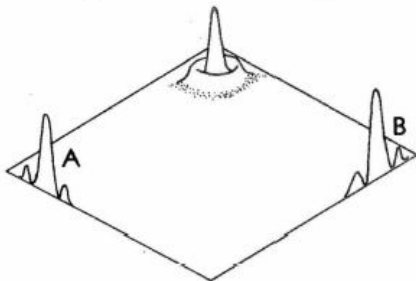
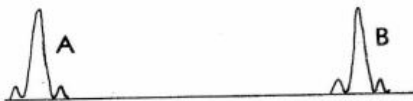



Fig. 9.3. Espaço de configurações versus espaço real. Duas ondas (A e B) estão se deslocando numa corda unidimensional. No Caso I, elas estão expressas como aspectos parciais de uma onda única no espaço bidimensional. No Caso II, elas estão expressas como duas ondas separadas, numa mesma corda. A onda mandatária quântica de dois quons se desloca no espaço de configurações (Caso I) e não no espaço real (Caso II) — as possibilidades quânticas se desenvolvem em uma arena conceitual com numerosas outras dimensões, além das três do espaço real.

Uma característica perturbadora dos quons com fases embaralhadas, primeiramente ressaltada por Erwin Schrödinger, é a estranha capa-

cidade de ação a distância que esses sistemas embaralhados parecem possuir — pelo menos no papel. Devido à sua conectibilidade de fase (ou, alternativamente, por serem representadas por uma só onda no espaço multidimensional), uma ação sobre o quon A parece ter um efeito instantâneo sobre a função ondulatória do quon B, mesmo quando os dois quons já não podem agir um sobre o outro através de forças convencionais. Schrödinger considerou tão incomum essa aparente conexão instantânea, que a chamou de *o* aspecto principal da teoria quântica, e não *um* dos aspectos principais dessa teoria.

Contudo, o fato de que essa conexão firme entre dois quons separados existe no *formalismo* da teoria quântica não garante que essa conexão exista *na realidade.* A conexão quântica pode ser tão fictícia quanto as linhas pontilhadas que esboçam as constelações nos mapas estelares. A despeito do fato de que "algo" parece ligar dois quons instantaneamente (mais rapi-

damente do que a luz), a teoria quântica não parece admitir a transmissão de mensagens através dessa ligação (ver a prova de Eberhard no Capítulo 13), o que vem reforçara impressão de que tais ligações não são genuínas.

O fato de que a observação de um quon *aqui* altera instantaneamente a função ondulatória *lá* (onde "lá" pode estar a uma distância de bilhões de milhas) é outro bom argumento a favor da natureza fictícia da onda mandatária. Se as funções ondulatórias fossem reais, elas teriam que alterar drasticamente a sua forma ao longo de grandes distâncias, com velocidades superiores à da luz. Até onde sabemos, nada que seja real pode se mover a essas velocidades. A fim de enfrentar essas objeções, Heisenberg levantou a hipótese de que a função ondulatória não representa uma situação real, mas, apenas, o nosso conhecimento de uma situação física. O colapso da função ondulatória não é um evento físico real, mas representa a altera-

ção que ocorre em nosso conhecimento quando nos damos conta do resultado de uma medição. A interpretação do conhecimento torna, também, mais fáceis de entender as medições no estilo de Renninger (nas quais não ocorre nenhum registro) : em certas situações, o fato de que "nada acontece" pode aumentar o nosso conhecimento sem o auxílio de qualquer alteração física.

Se um amigo nosso, no Texas, coloca uma moeda de prata num envelope e uma de ouro em outro envelope e envia pelo correio os dois envelopes, um para Tóquio e outro para Londres, no instante em que o leitor abre, no Japão, o seu envelope, fica sabendo o que contém o meu envelope na Inglaterra. Contudo, a abertura do leitor não causa qualquer alteração física (mais rápida, ou não, do que *a luz) na Inglaterra***,** mas *implica***,** apenas, *numa* alteração do conhecimento do leitor a respeito de algo que está acontecendo a uma grande distância e fora

do seu controle. Certamente aprendemos algo a respeito de uma moeda observando a outra. No entanto, esse conhecimento não é transmitido fisicamente de Londres para Tóquio, mas reside numa relação preestabelecida entre as duas moedas. As moedas de prata e de ouro estão *correlacionadas mas não conectadas*. Entre elas não existe nenhuma ligação real. De maneira semelhante, de acordo com a interpretação do conhecimento de Heisenberg, não há nada real ligando quons de fases embaralhadas e separados por grandes distâncias. Conexões de fase instantâneas existem na matemática, mas não no mundo real. Não se deve levá-las a sério.

Muitas entidades que parecem existir não são parte do mundo real — por exemplo, a imagem virtual. Uma imagem virtual parece estar em um lugar onde realmente não está. O arco-íris é uma imagem virtual: ele pode parecer que está localizado onde não há nem chuva, nem

luz solar. O mundo de Alice, no outro lado do espelho é, igualmente, uma imagem virtual. No que concerne às leis da ótica, essas imagens são tão reais quanto o nosso nariz. Elas podem ser fotografadas, ampliadas e refletidas do mesmo modo que a imagem de qualquer objeto real. Mas a experiência comum possui critérios mais rígidos, para o que é ou não é real, do que as leis da ótica. Como qualquer criança sabe, não há absolutamente nada atrás de um espelho.

Por outro lado, a analogia com as moedas de ouro e prata, embora convincente, pode não ser um modelo apropriado para as correlações quânticas. Heisenberg de fato sugeriu a hipótese de que o colapso da função ondulatória representa uma alteração no conhecimento do observador, e não um evento físico real, mas tomou o cuidado de acrescentar que esse conhecimento não era o de uma realidade preexistente. O conhecimento de um sistema quântico não é obtido através de uma inspeção passi-

va, e sim necessariamente através de uma intervenção ativa por parte do observador. "O que aprendemos sobre a natureza", diz Heisenberg, "não é sobre a natureza em si mesma, mas a natureza exposta aos nossos métodos de questionamento."

Assim como a ignorância quântica é diferente da ignorância clássica, o "conhecimento" que adquirimos numa medição quântica pertence a uma espécie diferente daquela que obtemos com a abertura de uma carta. Talvez não possamos descartar tão facilmente a realidade da conexão instantânea recorrendo a modelos comuns de conhecimento, tais como o das moedas correlacionadas.

A suspeita de que o embaralhamento matemático das fases é uma evidência a favor da existência da conexão quântica no mundo real foi reforçada pela descoberta, feita por John Bell, de que "as correlações quânticas são demasiado fortes" para serem esclarecidas através

de modelos comuns do conhecimento, do tipo moeda de ouro ou de prata. O teorema de Bell (a ser revisto no Capítulo 12) mostra que, para explicar o comportamento de certos sistemas constituídos de dois fótons, será necessário invocar modelos de realidade extremamente drásticos, modelos que exigem a existência real de uma conexão de longo alcance, penetrante e poderosa.

Realidade Quântica # 4: Interpretação dos mundos múltiplos. Essa realidade quântica concebida por Hugh Everett em 1957, quando se candidatava ao Ph.D. sob-a orientação de John Wheeler, considera seriamente o problema da medição quântica e o resolve de uma maneira atrevida e brilhante.

O problema da medição pode ser enunciado de muitas maneiras. Everett o viu assim: a ontologia ortodoxa trata a medição como um tipo especial de interação, mas sabemos que ***as*** *in-*

terações de medição não podem ser realmente especiais porque os instrumentos *M* não são em nada diferentes de tudo o mais no mundo. Como, então, indaga Everett, podemos eliminar esse status privilegiado do ato de medir, e alcançar no domínio da física a *democracia das interações que* certamente prevalece na natureza?

Bohr, por exemplo, confere aos instrumentos de medida um status especial, atribuindo-lhes uma realidade do tipo clássico que as entidades atômicas, submetidas ao seu escrutínio, não possuem. Von Neumann, por outro lado, não considera especiais os instrumentos *M,* e os descreve em termos de ondas de possibilidade, do mesmo modo que os átomos. Contudo, o preço que von Neumann pagou para estabelecer essa igualdade dos modos de ser, foi o de conferir, necessariamente, ao ato de medir, um status especial. Ao contrário de todas as outras interações da natureza, a medição tem o poder

de provocar o colapso da função ondulatória, reduzindo as numerosas possibilidades paralelas (a superposição de possibilidades, *anterior à medição) a somente* uma *possibilidade (o resultado* real da medição).

Seguindo a figuração de von Neumann para a teoria quântica, Everett representa tudo através de ondas mandatárias, mas deixa de fora o colapso da função ondulatória. Quando um sistema quântico encontra um instrumento *M* ajustado para medir um determinado atributo, ele se divide, da maneira usual, em várias formas ondulatórias, cada uma correspondendo a um possível valor daquele atributo. O que há de novo no modelo de Everett, é que, a cada uma dessas funções ondulatórias do sistema, está correlacionada uma determinada forma ondulatória do instrumento *M*, que registra um desses valores do atributo. Assim, se o atributo medido possui cinco valores possíveis, o conjunto formado pela entidade quântica e o instrumento

de medida se divide em cinco sistemas quânticos, cada um deles com um diferente valor do atributo, formando pares com os cinco instrumentos de medida, registrando, cada um, o valor do atributo. Ao invés de provocar o colapso da função ondulatória, reduzindo as cinco possibilidades a um resultado real, o sistema quântico da interpretação de Everett realiza *os cinco resultados*.

Para enfrentar o fato imutável de que ninguém viu jamais um instrumento *M* se transformar em cinco, Everett faz uma proposta um tanto atrevida: o aparelho realmente se divide em cinco partes, mas cada uma ocupa o *seu universo paralelo próprio*. Um ser humano — um dos críticos de Everett, por exemplo — vive em um desses universos (num determinado momento) e não pode perceber os outros quatro. Do mesmo modo os habitantes dos outros quatro universos não têm conhecimento dos parceiros paralelos.

O "caráter comum" dos fatos quânticos, a despeito da existência real dos universos múltiplos, é justificado no modelo de Everett pelo fato de que cada observador humano percebe apenas um sò universo. Não sabemos por que a percepção humana está limitada a um tão pequeno setor do mundo real, mas isso parece ser um fato inevitável. Não somos diretamente informados sobre esses mundos alternativos, mas o nosso próprio universo não seria o mesmo sem eles.

A teoria quântica de Everett, sem colapso, descreve o mundo como uma selva de possibilidades conflitantes proliferando continuamente, cada possibilidade encerrada no seu próprio universo. Nesse mundo (que poderíamos chamar de super-realidade) um instrumento *M* se divide em cinco. No entanto, acontece que os seres humanos não vivem na super-real idade, e sim no mundo da simples realidade, onde uma só coisa acontece de cada vez. Podemos figurar

a super-real idade, de Everett como uma árvore de possibilidades que está sempre formando novos galhos, onde tudo aquilo que pode acontecer realmente acontece. Cada experiência individual (vivida na simples realidade, e não na super-real idade) é uma diminuta porção de um ganho isolado dessa árvore exuberante, em perpétua florescência.

Todas as interações no mundo super-real de Everett são do mesmo tipo: dois sistemas se juntam, tornam-se correlacionados, e começam a realizar todas as suas possibilidades mútuas. Um instrumento de medida é exatamente igual a qualquer outra entidade quântica, com a exceção de que os seus atributos macroscópicos são particularmente sensíveis a algum atributo (comumente à posição) de uma entidade atômica com o qual pode estar correlacionado. Numerosas entidades tornam-se correlacionadas aos fótons, porém poucas se qualificam como detectores de fótons porque os seus atributos vi-

síveis não são significativamente alterados por essa associação. A nossa combinação fósforo/tela fotossensível é diferente: ela imprime um sinal numa fita sempre que se torna correlacionada ao atributo posição de um fóton. No modelo de Everett, os instrumentos *M* não são essencial mente diferentes de tudo o mais, com exceção de certos detalhes irrelevantes.

A interpretação da teoria quântica de Everett (dos mundos múltiplos), não obstante o inusitado reconhecimento de numerosos mundos paralelos não observáveis, está entre os modelos favoritos de muitos físicos teóricos porque, dentre as realidades quânticas, é a única que parece resolver o problema da medição sem canonizar arbitrariamente o processo da medição. Na figuração de Everett, todos os instrumentos e ações de medida têm fundamentalmente a mesma natureza de todos os outros instrumentos e ações. Estritamente falando, não existem "medições” no mundo, existem so-

mente correlações.

Einstein se opôs às propostas de uma realidade criada pelo observador, na teoria quântica, dizendo que não podia imaginar um camundongo com o poder de alterar drasticamente o universo simplesmente por tê-lo olhado. Everett responde à objeção de Einstein dizendo que a situação real é justamente inversa: "O sistema não é mais afetado pela observação, do que o observador que se torna correlacionado ao sistema." A moral do conto de Everett é simples: se você não quer se dividir, pare de olhar para os sistemas carregados de atributos.

Numa conferência recente sobre a natureza da realidade quântica, o físico Henry Stapp, de Berkeley, lembrou uma vantagem que a realidade quântica de Everett traz para a evolução biológica e outros improváveis mas não impossíveis processos. Suponhamos, diz Stapp, que se possa calcular a probabilidade que a vida teria de começar na Terra e que se chegasse à

conclusão de que essa probabilidade era infinitamente pequena, mas não igual a zero. No modelo convencional do universo único, algo cuja probabilidade é muito pequena torna-se efetivamente impossível: não acontecerá nunca. Porém, na figuração de Everett, tudo que pode acontecer, de fato acontece. Se a vida na Terra é, por pouco que seja, possível, ela é inevitável — em algum canto da super-realidade. No generoso multiuniverso de Everett, cada pequenino "pode ser", não importa quão improvável, terá a sua hora de brilhar.

10. Realidades Quânticas: Mais Quatro

> Quero saber como Deus criou este mundo. Não estou interessado neste ou naquele fenômeno, no espectro deste ou daquele elemento. Quero conhecer os Seus pensamentos, o resto são detalhes.
> Albert Einstein

Realidade Quântica # 5: A lógica quântica. (O mundo obedece a um tipo de raciocínio não humano.) Em 1936, John Neumann e o matemático de Harvard, Garrett Birkhoff, propuseram uma nova abordagem da teoria quântica a que deram o nome de lógica quântica. A "lógica" de uma entidade é o modo pelo qual os seus atributos se combinam para formar outros atributos.

Os atributos dos objetos clássicos obedecem a um padrão conhecido, denominado lógica bo-

oliana, em homenagem a George Boole, mestre-escola irlandês que pela primeira vez, codificou a estrutura do raciocínio comum. Birkhoff e von Neumann mostram que, por serem representados por formas ondulatórias, os atributos quânticos se combinam segundo uma estranha "lógica ondulatória".

Consideremos um agrupamento de entidades que podem *possuir os atributos* A ou B, ou ambos. Com o conjunto de entidades que possuem o atributo A e o conjunto de entidades, que possuem o atributo B, podemos formar dois novos conjuntos combinando os conjuntos A e B de acordo com as operações lógicas E e OU.

Quando combinamos os conjuntos A e B de acordo com a operação *E* obtemos um outro conjunto C (simbolicamente, A *E* B = C) que contém todas as entidades que possuem ***os** dois atributos* A e B, ao mesmo tempo. A posse simultânea dos atributos A e B pode ser conside-

rada como um novo atributo C. Note-se que A E A = A.

Combinando os conjuntos A e B de acordo com a operação OU, obtemos um outro conjunto D (simbolicamente, A OU B = D) que contém todas as entidades que possuem o atributo A ou o atributo B ou ambos. A posse de um desses atributos pode ser considerada como um novo atributo D. Note-se que A OU A = A.

AS TRELIÇAS LÓGICAS

Para figurar a estrutura de várias lógicas, os matemáticos utilizam um diagrama denominado treliça, que mostra, num relance, todas as relações E/OU entre os atributos. Uma treliça ordena os atributos de um sistema de acordo com a sua abrangência, com o mais abrangente no topo. Os atributos são ligados por meio de linhas que mostram como cada par de atributos mais baixos se juntam para formar um atributo

mais alto. A treliça das cores é um exemplo de diagrama da lógica clássica, que apresenta as relações lógicas existentes entre as cores primárias e complementares (Fig. 10.1). As cores primárias (vermelho, verde e azul) são a base das misturas aditivas de cores, como as que formam as imagens da TV colorida. A impressão em cores (processo subtrativo) é baseada em misturas das cores complementares: amarelo, magenta e ciano (Cor azul-esverdeada, também chamada ciano N. do T).

Para calcular o resultado da operação E de qualquer par de atributos A e B utilizando um diagrama de treliça, procura-se o atributo comum mais alto que pode ser encontrado seguindo as tinhas de cima para baixo, partindo de A e B. Por exemplo a operação (ciano E magenta) é efetuada seguindo as linhas da treliça de cima para baixo, partindo dos atributos ciano e magenta. O atributo mais alto determinado pela interseção dessas linhas no sentido de cima pa-

ra baixo é o azul. Dizemos que ciano E magenta = azul, o que significa que o azul é o atributo mais abrangente que o ciano e o magenta têm em comum. De modo semelhante, pode-se ler na treliça o resultado da operação E aplicada a qualquer par de atributos.

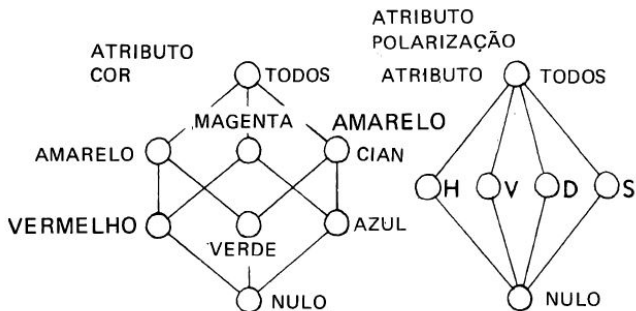



Fig. 10.1. Uma treliça clássica e uma treliça quântica. Uma treliça de atributos mostra, num diagrama, como qualquer par de atributos se combina para formar um novo atributo. A treliça do atributo cor é booliana; a treliça do atributo polarização não é booliana.

Para calcular o resultado da operação OU de qualquer par de atributos A e B utilizando

um diagrama de treliça, procura-se o atributo comum mais baixo que pode ser encontrado seguindo as linhas de baixo para cima, partindo de A e B. Por exemplo, a operação (ciano ou magenta) é efetuada seguindo as linhas da treliça de baixo para cima, partindo dos atributos ciano e magenta. O atributo mais baixo determinado pela interseção dessas linhas é o branco. O atributo branco é indicado pelo termo “Todos" na Fig. 10.1 porque a luz branca é uma mistura de todas as cores. Dizemos que cian OU magenta = branco, o que significa que o branco é o menor (menos abrangente) atributo que contém simultaneamente o cian e o magenta.

Essas relações E e OU são mais do que conexões lógicas abstratas; elas correspondem a operações físicas reais. A operação E efetuada juntando-se filtros de cores. A operação cian E magenta = azul corresponde a colocar um filtro cian (que só deixa passar a luz cian) junto

com um filtro magenta (que só deixa passar a luz magenta) para formar um filtro de combinação que só deixa passar a luz azul.

Assim como a operação E corresponde a juntar dois filtros coloridos, a operação OU corresponde a juntar duas luzes coloridas. A. operação cian OU magenta = branco descreve a produção de luz "branca" mediante a mistura das luzes cian e magenta. Como tanto o magenta como o cian contêm o azul, a luz combinada não é puramente branca, e sim azulada; não obstante, essa luz é chamada de "branca” porque um detector de luz branca (filme ortocromático ou fósforo de larga faixa) responderá a essa luz em toda a sua faixa de sensibilidade.

A cor é um atributo clássico que segue as regras de Boole para E e OU; a treliça para a cor é um exemplo de diagrama booliano. Um exemplo simples de um diagrama lógico quântico não booliano é a treliça dos atributos polarização. A polarização P(<j>), apresentada no

Capítulo 8, é um atributo quântico determinado para qualquer direção   p(&) do espaço, que pode assumir somente dois valores. Para simplificar, consideremos apenas duas direções, 0º e 45°, com as respectivas polarizações P(0) e P(45). O atributo P(0) pode assumir somente os valores H e V, enquanto que o atributo P(45) toma apenas os valores D e CD. A treliça lógica para esses dois atributos está mostrada na Fig. 10.1.

As duas relações lógicas quânticas que podemos ler nessa treliça são H OU D = todos e H E D = nulo. A operação H OU D = todos significa que todos ,os atributos polarização, sejam eles quais forem, podem ser obtidos de uma superposição de luz H e D (desde que as juntemos em fase apropriada).

A operação H E D = nulo significa que H e D não possuem nenhum atributo polarização isolado comum: nenhum raio de luz concebível passa sucessivamente por dois filtros, um H e

outro D.

Entre as regras que toda treliça booliana deve obedecer está a lei distributiva segundo a qual, para três atributos quaisquer A, B e C, a seguinte relação deverá ser válida:

A OU (B E C) = (A OU B) E (A OU C)

De um modo grosseiro, a lei distributiva exige que as partes de um atributo combinação — (B E C), por exemplo - possam ser operadas e depois combinadas, dando o mesmo resultado que se obteria se operássemos o atributo combinação isolado. Em outras palavras, nos sistemas que obedecem à lei distributiva, o atributo combinação se comporta como a soma de suas partes.

Por ser booliana, a treliça do atributo cor segue a lei distributiva para qualquer trio de atributos, por exemplo:

V OU (C E M) = V OU A = M
(V OU C) E (V OU M) = B E M = M

onde V, C, M, A, B são as iniciais das cores (V corresponde ao vermelho).

As treliças lógicas quânticas seguem todas as regras bóolianas com exceção da lei distributiva. Existem certos trios de atributos polarização, por exemplo, para os quais a lei distributiva não é válida:

H OU (D E CD) = H OU N = H
(H OU D) E (H OU CD) = T E T = T

Resolvendo diretamente a expressão H QU (D E CD), obtemos o atributo H. Se separamos os atributos D e CD e efetuamos as operações, obtemos o atributo T. Como os dois atributos resultantes não são os mesmos, a lei distributi-

va não foi obedecida nessa combinação particular de atributos. Outros exemplos podem ser facilmente encontrados. Os atributos polarização P(0) e P(45) formam uma treliça não distributiva. Contudo, embora a treliça polarização viole uma das regras boolianas, ela poderá sempre ser dividida em subtreliças que são inteiramente boolianas. Por exemplo a subtreliça de quatro elementos formada pelos atributos (H, V, N, T) e a subtreliça constituída por (CD, D, N, T) são ambas boolianas, mas a treliça total não é.

Todos os atributos de um objeto clássico podem ser medidos simultaneamente; um objeto clássico está completamente aberto à observação. Uma entidade quântica é diferente: somente certos conjuntos de atributos compatíveis podem ser medidos simultaneamente. As subtreliças boolianas da treliça lógica quântica inteira são constituídas somente de atributos compatíveis (H e V, por exemplo) que podem

ser medidos simultaneamente. Os atributos compatíveis, obedecem à lógica comum — uma lógica que reflete o "caráter comum superficial" do fato quântico — a condição humana, repetidamente ressaltada por Bohr, de que tudo o que experimentamos neste mundo é necessariamente descritível em linguagem clássica, i.e., na linguagem booliana.

Uma entidade quântica nunca está completamente aberta à observação: os seus atributos compatíveis visíveis representam apenas uma parte da sua inteira faixa de possibilidades. O restante da treliça quântica contém as relações ocultas que distinguem uma entidade quântica de um objeto clássico. Todas as treliças quânticas consistem de uma união de subtreliças boolianas (também chamadas, às vezes, de "ilhas de Boole") à deriva em um oceano lógico ondulatório de relações não boolianas. No interior de cada ilha de Boole prevalecem as relações lógicas normais, correspondentes ao caráter co-

mum superficial (efeito Cinderela) dos atributos quânticos compatíveis. Mas as relações entre as ilhas boolianas não obedecem à lei distributiva, indicando que para as entidades quânticas há algo estranho nas conexões entre o todo e suas partes.

A lógica quântica não teve grande impacto sobre a física prática porque a maior parte do trabalho efetuado em seu nome não dizia respeito à natureza da realidade, nem à elucidação das experiências, e sim ao estudo, em si, das treliças não distributivas. Uma significativa exceção a essa preocupação geral com o formalismo, às expensas da física, é o trabalho de David Finkelstein, do Instituto de Tecnologia da Georgia, que espera usar a lógica quântica para ver, além da teoria quântica, os verdadeiros processos que governam o mundo.

Ao contrário de Bohr, que sustentava a noção de que os atributos quânticos são relacionais — i.e., divididos entre o quon e o instru-

mento de medida — e de Wheeler, que acredita nos atributos criados pelo observador, Finkelstein adota o ponto de vista do senso comum de que os quons realmente possuem os seus atributos medidos, do mesmo modo que os objetos clássicos. No modelo de Finkelstein os quons diferem dos objetos clássicos, não no modo pelo qual possuem os seus atributos, mas em como esses atributos combinam para formar novos atributos. As entidades quânticas possuem atributos clássicos que obedecem a uma lógica não clássica.

Um objeto clássico possui partes que se encaixam de uma só maneira — como os relógios, que podem ser descritos de modo completo, mediante uma lista de peças e um desenho da montagem. Uma entidade quântica, por outro lado, segue uma "lógica ondulatória" e não possui partes definidas: ela pode se dividir segundo um grande número de maneiras diferentes, tantas quantos são os alfabetos de formas ondu-

latórias que podem ser utilizados na análise da sua onda mandatária. Cada uma dessas divisões produz uma visão válida, no sentido clássico, da entidade quântica, porém, as conexões entre essas visões comuns é governada por uma lógica ondulatória, cuja representação não é um desenho de montagem, mas sim uma treliça não distributiva.

O PARADOXO DOS TRÊS POLARIZADORES

Como exemplo da lógica ondulatória em ação, consideremos o chamado "paradoxo dos três polarizadores". Um filtro polarizador consiste de uma folha de plástico de cor cinza, que deixa passar somente um tipo de luz polarizada.

Como o cristal de calcita, um filtro polarizador possui um eixo ótico, e divide a luz em dois feixes: um deles polarizado paralelamente ao eixo ótico, e outro a noventa graus com este.

Ao contrário da calcita, que divide a luz, mas transmite os dois feixes, o polarizador absorve o feixe polarizado perpendicularmente ao eixo ótico e deixa passar o feixe polarizado paralelamente ao eixo ótico.

Identificamos um filtro polarizado pelo tipo de luz que ele deixa passar. Assim, um polarizador cujo eixo ótico é horizontal é denominado filtro polarizador horizontal (ou filtro H, para abreviar). Um polarizador constitui um analisador de polarização de uso geral: a mesma folha de plástico cinza pode agir como filtro H, V, D, ou CD, dependendo da inclinação que lhe for dada. Para a luz horizontalmente polarizada, o filtro H age como uma janela aberta; para a luz verticalmente polarizada, o mesmo filtro aparece negro.

Tomemos um filtro H e coloquemos em frente a um filtro V. Nessa configuração de filtros cruzados, a luz que passa pelo primeiro filtro (luz H) é bloqueada completamente pelo se-

gundo filtro. Da mesma forma que uma janela fechada, um par de polarizadores cruzados absorve toda a luz incidente, independentemente da sua polarização.

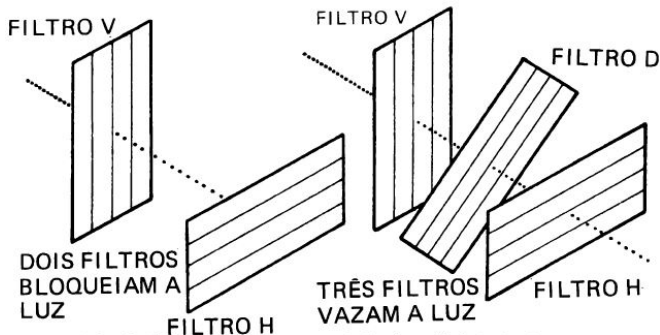



Fig. 10.2. O "paradoxo dos tres polarizadores". Polarizadores cruzados (filtro H + filtro V) bloqueiam toda a luz. A adição de um terceiro filtro (filtro D) faz a luz passar. Dois absorventes são suficientes para bloquear a luz. Por que a adição de um terceiro absorvente faz a luz passar?

Tomemos agora um terceiro polarizador orientado na direção D (diagonal = 45° com a vertical). Esse filtro D absorve a luz CD (contradiagonal = - 45° com a vertical) e deixa pas-

sara luz D. Coloquemos esse filtro D à frente dos dois polarizadores cruzados. Como qualquer tipo de luz, a luz D será completamente absorvida. 0 conjunto formado pelos três filtros permanece opaco.

Coloquemos, agora, o filtro D atrás dos dois polarizadores cruzados. Como nenhuma luz passa pelos polarizadores cruzados, a colocação de um filtro atrás deles não tem qualquer efeito: o conjunto formado pelos três filtros bloqueia toda a luz.

Coloquemos, agora, o filtro D entre os dois polarizadores cruzados. Quando fazemos isso, a luz começa a brilhar através do conjunto que, anteriormente, era opaco.

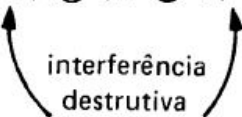
Esse é o paradoxo dos três polarizadores: um filtro H e um filtro V, juntos, bloqueiam toda a luz. Considerando que qualquer filtro, independentemente de sua orientação, não faz nada além de absorver luz, como a inserção de um terceiro filtro pode fazer passar mais luz?

Como o fechamento de uma janela (adição de mais um absorvente) permite a entrada da luz?

Esse estranho comportamento da luz que passa através de folhas de plástico pode ser esclarecido pela representação do atributo polarização, à maneira quântica, por uma forma ondulatória especial.

Dois polarizadores cruzados bloqueiam toda a luz porque a luz que atravessa o primeiro filtro (luz H) não contém luz V, que é o único tipo de luz que passa pelo segundo filtro.

O atributo H, considerado como uma forma ondulatória, pode ser dividido (através da análise) em quantidades iguais de luz D e luz CD adicionadas numa determinada fase. A polarização H, formada por uma soma ondulatória de luz D e luz CD pode ser simbolizada como segue (onde © é o nosso símbolo para adição ondulatória):

$$H = D \oplus CD$$

Por outro lado, as polarizações D e CD podem ser formadas por uma soma ondulatória de amplitudes iguais de H e V adicionadas em fases determinadas.

$$D = H \oplus V$$

$$CD = H \oplus V$$

Tanto a polarização D quanto a polarização CD são formadas de partes iguais de luz H e V; a única diferença é a fase em que essas duas luzes são somadas. Essas expressões mostram que tanto a luz D quanto a luz CD contêm, como metade de sua constituição, a luz V. Contudo, D e CD se somam para formar a luz H, que não contém qualquer luz V. Isso só poderá acontecer se a luz V, de D, interferir destrutiva-

mente com a luz V, de CD:

$$H = D \oplus CD = (H \oplus V) \oplus (H \oplus V) = H$$

interferência destrutiva

Assim, embora não haja nenhuma luz V em um feixe H puro, esse feixe contém formas ondulatórias CD e D, constituídas de 50% de luz V; contudo, essa luz V é inteiramente eliminada pela interferência destrutiva.

Podemos ver agora como a absorção de um atributo pode contribuir para a passagem de mais luz. A inserção de um terceiro polarizador (filtro D) absorve a luz CD contida no feixe H puro. Essa eliminação de luz CD desfaz a interferência destrutiva perfeita que reduziu a zero a luz V. A luz D que ficou tem a sua metade

constituída de luz V sem nada que a cancele. Essa luz V não cancelada é o que passa através do segundo filtro. A inserção de um absorvente deixa passar mais luz. Eliminando um dos membros de um par de atributos interferentes, o filtro D parece criar uma luz vinda do nada.

Esse curioso comportamento dos filtros polarizadores suplementa a explicação da desintegração da partícula K com interveniência de mais um quark, prevista por Sheldon Glashow e discutida no Capítulo 6. No caso de Glashow, a introdução de um segundo canal de quark suprime completamente um certo tipo de desintegração porque a natureza ondulatória dos dois canais permite que eles se cancelem. No paradoxo dos três polarizadores, a remoção de uma luz faz passar mais luz (menos é mais); no modelo de Glashow para a desintegração da partícula K com interveniência de mais um quark, a adição de um segundo canal de desintegração produziu a supressão global da desintegração

(mais é menos). Como mostram esses exemplos, os atributos quânticos não obedecem às leis da aritmética comum, mas às de um estranho tipo de aritmética ondulatória.

Os lógicos quânticos explicam o paradoxo dos três polarizadores como um simples caso de lógica não distributiva. O filtro H deixa passar somente fótons polarizados horizontalmente. O filtro interveniente D deixa passar fótons polarizados simultaneamente nas direções horizontal e diagonal. No entanto, embora nenhum fóton polarizado horizontalmente possa ser polarizado verticalmente, alguns fótons polarizados simultaneamente nas direções horizontal e diagonal podem estar polarizados na direção vertical.

UM RODEIO NÃO BOOLIANO

A singularidade da descrição quântico-lógica do paradoxo dos três polarizadores pode ser

melhor apreciada através da sua aplicação a uma situação mais conhecida. Devemos essa ilustração à peripatética filósofa da ciência Adriana Chernavska.

Vamos supor que estamos conduzindo gado através de uma porteira que só permita passar os machos e rejeite todas as fêmeas. Em seguida passamos esses machos por uma segunda porteira que deixe passar somente animais pretos e rejeite todos os brancos. Somente os animais que são simultaneamente machos E pretos podem passar pelas duas porteiras. Para nossa surpresa, aproximadamente a metade desses animais se revela como sendo constituída de fêmeas!

É claro que o gado não se comporta desse modo, mas, se acreditamos nos lógicos quânticos, é isso exatamente o que acontece aos fótons polarizados quando atravessam as pequenas folhas de plástico. Os atributos de um fóton obedecem a uma lógica não humana que preci-

sa ser entendida, se quisermos ver algum sentido no que está realmente acontecendo no mundo quântico.

Realidade Quântica # 6: Neorrealismo. (O mundo é constituído de objetos comuns) A linha final de muitas experiências quânticas consiste de um padrão de diminutos clarões numa tela de fósforo. Será assim tão óbvio o fato de que esse simples fenômeno — a base de todas as imagens da TV — só possa ser explicado mediante recurso a alguma exótica realidade quântica? Observando o aparecimento, um a um, desses pequenos clarões luminosos na tela é fácil imaginar que eles são causados por pequenos objetos — elétrons reais, com atributos próprios de posição e quantidade de movimento. Essa noção derivada do senso comum, de que o caráter comum da experiência direta pode ser explicado por uma realidade subjacente igualmente comum, constitui a base do

que chamamos de neorrealismo. Os neorrealistas afirmam que os objetos familiares que constituem o mundo do dia-a-dia são, também, feitos de objetos comuns; eles acreditam, em resumo, que os átomos são "coisas".

Essa visão direta da verdadeira natureza do mundo tem sido rejeitada pelos físicos em geral como mal orientada e incorrigivelmente ingênua. Werner Heisenberg, por exemplo, considerava essa maneira de pensar tão ultrapassada quanto a ideia de uma Terra plana: "A ontologia do materialismo repousava na ilusão de que essa forma de existência, essa 'realidade' direta do mundo que nos cerca, podem ser estendidas ao raio de ação do átomo. Essa extrapolação é, contudo, impossível... Átomos não são coisas."

O neorrealismo não somente foi rejeitado por Heisenberg, Bohr e outros patriarcas fundadores da teoria quântica e pela maior parte da comunidade científica, como foi condenado pela maior autoridade matemática da Nova Fí-

sica. O matemático de fama mundial John von Neumann, em sua bíblia quântica, examinou as afirmações dos neorrealistas e rejeitou-as de maneira conclusiva. Von Neumann mostrou que, por representar os atributos através de formas ondulatórias, a teoria quântica faz previsões que nenhum conjunto de objetos comuns pode igualar. Em outras palavras, se a teoria quântica está correta, o neorrealismo é impossível. Essa conclusão, conhecida como prova de von Neumann, reforçou os argumentos a favor da dominante visão de Copenhague, amorteceu consideravelmente o entusiasmo dos físicos pelas heresias neorrealistas, e efetivamente interrompeu a presença de modelos do mundo, baseados em objetos, por mais de vinte anos.

O MONTE QUÂNTICO

Embora ninguém tenha jamais visto um átomo — nossa experiência com essas entidades têm

sido desesperadoramente indiretas — von Neumann provou que, sejam como forem, os átomos não podem ser semelhantes aos objetos comuns. Para se ter uma ideia de como um matemático pode provar algo a respeito de uma realidade invisível, consideremos a seguinte situação:

Numa esquina de Nova Iorque, uma figura bem-falante, pomposamente vestida, oferece a você uma oportunidade de ganhar algum dinheiro fácil. Sobre uma mesa dobrável, dessas que se transformam numa maleta, ele coloca três cartas de baralho voltadas para baixo. Por uma comissão de dez dólares, ele cede a você duas dessas cartas. Se as cartas forem de naipes da mesma cor, ele as comprará de volta por cinquenta dólares; uma carta vermelha e uma preta não valerão nada. Para provar que não se trata de um simples passe de mágica, ele não toca nas cartas escolhidas por você; simplesmente pega a carta não escolhida e a recoloca no

baralho.

Suponhamos que você resolva jogar algumas vezes e não ganhe. A culpa pode ser da sua má sorte. Mas, após perder uma dúzia de vezes, você começa a suspeitar.

"Espera aí, há alguma coisa engraçada nesse jogo."

"Por que diz isso, irmão?" Ele sorri, mostrando uma fileira brilhante de dentes de ouro.

"Porque posso *provar* que nenhuma carta pode fazer o que estas estão fazendo."

"Sério? Gostaria muito de conhecer essa prova", diz ele. "Eu mesmo tenho pensado muito a respeito dessas cartas."

"Olha aqui, você não pode estar dando três cartas da mesma cor, porque, nesse caso, *certamente* eu teria pegado um par. E se você estivesse dando duas cartas de uma mesma cor e uma terceira qualquer, eu teria uma chance em três de tirar um par, mas em vinte tentativas não tirei nenhum. Notei também que ninguém mais

está conseguindo tirar um par. E o ponto crucial é que não há outra maneira de dar três cartas."

"E isso é um fato indiscutível?"

"Claro! Você não vê? Se você tem três cartas e apenas duas cores, pelo menos duas dessas cartas têm que ser da mesma cor. É impossível dar três cartas, cada uma de uma cor diferente!"

"Tudo bem, menino, você me pegou. Mas é preciso ser esperto para descobrir. Só mesmo um sujeito com o cérebro igual ao seu podia ter descoberto que essas cartas são especiais. Vou lhe contar o meu segredo. Elas não são cartas comuns; são objetos quânticos, que meu tio Johnny prepara lá em Nova Jérsei. Olha aqui, irmão, já que você está por dentro do meu truque, vou lhe dizer o que vou fazer. Vou vender para você o resto do baralho pelo mesmo preço que você pagou por essas cartas que tem na mão. Como você viu, você pode fazer uma fortuna com objetos quânticos."

Esse jogo hipotético (que chamo de monte quântico) se parece muito com os fótons polarizados. Os argumentos do jogador desapontado seguem a mesma lógica da prova de von Neumann. Se as três cartas na mesa do banqueiro do jogo fossem objetos comuns, não haveria possibilidade de todas serem diferentes. Ainda assim, o jogador nunca pega um par, por mais que tente. Consequentemente, as cartas não podem ser objetos comuns.

Essa prova de que as cartas não são objetos se baseia na presunção de que o banqueiro é honesto. No caso do "monte quântico", essa presunção pode ser uma ingenuidade. No caso dos fótons polarizados, podemos provavelmente presumir que o universo não está tentando nos fazer de tolos. Como Einstein uma vez ressaltou: "A natureza é inteligente, mas não é maliciosa."

Esse jogo de cartas lembra, de vários modos, uma experiência quântica típica. Tanto o

fato quântico como o monte quântico possuem, em comum, o elemento sorte e o fato de que cada evento que ocorre não é, por si só, relevante (efeito Cinderela). E o padrão estatístico que, nos dois casos, denuncia o jogo.

Outra maneira pela qual esse jogo lembra o mundo quântico é que, para funcionar, ambos impõe uma restrição definida à medição. No monte quântico, não se pode olhar a terceira carta; numa experiência quântica, não se pode examinar o atributo conjugado. Tanto no jogo de cartas como no laboratório, nada afinal está escondido: pode-se escolher livremente (opção métrica) o que se vai observar. Porém, toda escolha do aspecto que se vai examinar implica em não examinar algum outro aspecto.

O MODELO DE OBJETO COMUM, DE DAVID BOHM, PARA O ELÉTRON

Nos primeiros anos da década de 50, David

Bohm publicou o seu conhecido livro didático intitulado Quantum Theory, que permanece até hoje como uma das mais inteligíveis apresentações da visão de Copenhague. Ainda em Princeton, suas conversas com Einstein que, já envelhecendo, era o mais importante propagador dá visão realista do mundo ("A realidade é o verdadeiro assunto de que trata a física"), enfraqueceram consideravelmente a sua fé no copenhaguenismo. Bohm não demorou para tornar mais concreta essa falta de fé, construindo um modelo do mundo em que o elétron é um objeto comum, e que se harmoniza com as previsões da teoria quântica

O modelo de Bohm consegue contornar as condições da prova de von Neumann porque os seus elétrons, mesmo sendo objetos — possuem atributos próprios — apresentam atributos cujo comportamento é marcantemente estranho. Suponhamos que as cartas do monte quântico fossem realmente objetos quânticos

nos moldes dos elétrons de Bohm. Três cartas são dadas, e são todas pretas. Você escolhe a sua primeira carta e, com isso, as outras duas cartas se tornam vermelhas! Agora, quando você virar a carta seguinte, não obterá um par da mesma cor. O ato de virar uma carta provoca a mudança da cor das outras cartas!

No modelo de Bohm, cada elétron está sensivelmente sintonizado com tudo o que acontece no seu meio ambiente, especialmente com a presença de instrumentos de medida. Quando se monta a experiência, o elétron "muda de cor”, dependendo do que se resolva medir. Registramos o valor de um atributo que é, em parte, determinado por nossas próprias ações. O elétron sente o que está acontecendo em torno dele, através de um novo tipo de campo denominado "onda piloto". A onda piloto de Bohm põe o elétron em contato instantâneo com todas as partículas do universo. A instantaneidade dessa conexão evita que "enganemos

o elétron", fazendo duas medições simultâneas em locais diferentes — o que, efetivamente, equivaleria a virar duas cartas simultaneamente. A onda piloto é suficientemente rápida para que esses truque não funcionem.

Como o modelo de Bohm prevê os mesmos resultados da teoria quântica e, ainda assim, é feito de pequenos objetos, obviamente existe um furo na prova de von Neumann: a sua noção de "objeto comum" é demasiado restritiva. Os copenhaguenistas protestam, dizendo que entidades tão estranhas como as de Bohm dificilmente merecem ser chamadas de "objetos". Uma entidade que pode mudar instantaneamente as suas propriedades em razão de uma pequena alteração ocorrida a meio universo de distância não é um objeto comum. Os comandos para essa mudança teriam que ser transmitidos com uma velocidade maior do que a da luz, o que, conforme Einstein mostrou, é impossível. Embora os elétrons de Bohm — "pe-

quenos camaleões mais rápidos que a luz" — sejam um tipo de objeto que, concebivelmente, poderia fundamentar os fatos quânticos, os copenhaguenistas rejeitam a sua existência com base em que: 1. "objetos" não costumam entrar em contato com tudo o que existe no universo, e 2. especialmente, mais rapidamente que a luz.

Bohm pensou que poderia explicar os fatos quânticos através de uma realidade subjacente constituída de objetos, mas as extravagantes propriedades desses objetos frustram qualquer esperança de que a solução de Bohm represente um retorno à realidade comum. O sucesso de Bohm em contornar a prova de von Neumann, estimulou a construção de outros modelos neorrealistas da realidade quântica, mas todos contêm o mesmo "defeito" do de Bohm: a embaraçosa conexão instantânea de cada objeto com todos os outros. O físico John Bell, do Conseil Européen pour Recherches Nucléaires — CERN, mostrou, como parte do seu famoso

teorema, que essas conexões instantâneas não são um acidente, mas uma característica necessária de qualquer modelo de realidade baseado em objetos, bem como de muitos outros modelos de realidade.

Realidade Quântica # 7: (A consciência cria a realidade.) A primeira pessoa a sugerir que a teoria quântica indica que a realidade é criada pela consciência humana não foi nenhum esquisitão de algum recanto da física, mas o eminente matemático John von Neumann. Em sua bíblia quântica, *Die Grundlagen,* o mais influente livro sobre a teoria quântica já escrito, von Neumann conclui que, de um ponto de vista estritamente lógico, somente a presença da consciência pode resolver o problema da medição. Como matemático profissional, von Neumann estava habituado a seguir corajosamente um argumento lógico até onde este pudesse levá-lo. Aqui, contudo, encontrou

um severo teste para o seu profissionalismo, pois a sua lógica o conduziu a uma conclusão particularmente desagradável: o mundo não é objetivamente real, e depende, portanto, da mente do observador.

A argumentação de von Neumann é, talvez, difícil de acreditar, mas é fácil de entender. Ele começa admitindo que a teoria quântica está correta e se aplica a tudo no mundo, particularmente aos instrumentos de medida. Isso significa que tudo no mundo é representado por uma onda mandatária. Lembremos que Bohr conferia aos instrumentos M uma isenção especial da descrição quântica: na interpretação de Copenhague, os instrumentos M gozam de um status especial caracterizado pelo estilo clássico. No modelo todo quântico de von Neumann, os instrumentos de medida não são especiais, e, pelo contrário, são representados por ondas mandatárias, como tudo mais.

O preço que von Neumann teve que pagar

para tratar igualmente todas as entidades foi a necessidade do colapso da função ondulatória. Em algum ponto entre o sistema que está sendo observado e a mente do observador, a onda mandatária, ao invés de se expandir até preencher todas as suas possibilidades (a tendência natural das ondas mandatárias em qualquer lugar), precisa contrair-se numa única possibilidade: o resultado efetivo da medição. O que é especial no modelo de von Neumann não é o instrumento de medida, e sim o ato de medir, onde numerosas ondas subitamente se contraem numa só. Von Neumann mostrou que esse ato especial — o colapso da função ondulatória ou "salto quântico" — poderia ser localizado em qualquer ponto, sem que isso alterasse o resultado final, mas não poderia ser eliminado. Na descrição toda quântica do mundo, criada por von Neumann, o problema da medição quântica se reduz a uma questão: onde se dá, realmente, o colapso da função ondulatória?

Entre o sistema medido e a mente do observador, se estende uma série de instrumentos intermediários (cada um representado por sua onda mandatária própria), denominada cadeia de von Neumann. Nos termos de von Neumann, resolver o problema da medição consiste em encontrar o local em que a natureza rompe essa cadeia com um salto quântico.

O problema da medição, na versão de von Neumann, poderia ser resolvido facilmente se ao menos pudéssemos olhar o colapso da função ondulatória como um simples artifício matemático, e não como um processo físico real; como se esse colapso fosse um detalhe espúrio, presente na matemática, mas não no mundo real. Quando os dados dão o número sete, por exemplo, não vemos isto como um "colapso" das possibilidades dos dados, que as reduzisse a uma realidade especial. Por que então considerar o colapso da probabilidade quântica mais real, em qualquer sentido, do que a ocorrência

de um evento no jogo de dados?

O que dificulta a solução é o fato de que a ignorância quântica, que jaz sob a probabilidade quântica, é diferente, em gênero, da ignorância clássica responsável pela incerteza dos lances no jogo de dados. Segundo a ontologia ortodoxa, todos os quons individuais são exatamente iguais até o momento em que ocorre o salto quântico. Daí se conclui que esse salto é mais do que o cumprimento individual de leis válidas para conjuntos; o salto quântico é uma alteração repentina das regras que governam os eventos isolados.

Cada elo da cadeia de von Neumann (com uma exceção) é constituído de agrupamentos de quons em interação com outros quons. Como todos os quons são qualitativamente iguais, essas interações são, também, qualitativamente iguais. Quando não está numa situação de medição, a função ondulatória de um quon não apresenta qualquer tendência para o colapso.

Como pode um conjunto de quons saber se está "em campo aberto" ou no interior de algum instrumento de medida? Em um sistema constituído somente de quons, não parece existir um local especial que possa propiciar o salto quântico; não há nenhuma linha divisória natural entre o medidor e o que está sendo medido.

Alguns físicos têm sugerido que a essência de uma medição é a feitura de um registro. Como a feitura de um registro sempre envolve um evento irreversível — se não o registro se apaga — eles sugerem a hipótese de que a cadeia de von Neumann se parte naturalmente no primeiro processo termodinâmico irreversível. Contudo, a despeito de muito se ter discutido o modo pelo qual a desordem térmica poderia encerrar a chave do problema da medição, permanece o fato de que ninguém conseguiu mostrar que a ação desordenada é, por si só, suficiente para transformar a ignorância quântica (onde a informação desejada simplesmente não existe)

em ignorância clássica (onde a informação desejada existe mas está escondida).

A existência de medições em que "nada acontece" (medições de Renninger), onde o conhecimento é obtido através da ausência de uma detecção, também dificilmente pode se reconciliar com o ponto de vista de que as ações irreversíveis dão origem aos saltos quânticos. Numa medição de Renninger há sempre, necessariamente, a "possibilidade de uma ação irreversível": de fato, é necessária a presença de um detector no canal nulo, só que, no decorrer da medição, esse detector não faz o esperado "clique". Se levarmos a sério a noção de que as ações irreversíveis provocam o colapso da função ondulatória, as medições de Renninger nos obrigarão a acreditar que a mera possibilidade de uma ação irreversível é suficiente para ocasionar um salto quântico. A possibilidade da existência de medições como essas, "sem interação", significa que o colapso da função on-

dulatória não pode estar vinculado a algum processo aleatório específico que ocorra no interior do instrumento de medição.

O único elo incomum da cadeia de von Neumann é o que está entre o cérebro e a mente do observador. Ali, onde o mistério da matéria cede lugar ao mistério da mente, estaria uma posição privilegiada para o esquivo salto quântico.

O ponto essencial do argumento de von Neumann é o seguinte: para que um mundo todo quântico funcione, um processo especial — o salto quântico — precisa estar presente em todos os atos de medição, e em nenhum outro lugar. Porém, num mundo todo feito de substância quântica não existem processos privilegiados. O único processo especial não incluído no monopólio da matéria é a percepção do observador.

Eis aqui como os físicos Fritz London e Edmond Bauer resumem a defesa da Realidade

Quântica # 7:

"O acoplamento a um instrumento de medida ainda não é uma medição. Uma medição é alcançada somente quando a posição de um indicador tiver sido observada. É precisamente esse acréscimo de conhecimento, adquirido através da observação, que dá ao observador o direito de escolha entre os diferentes componentes da mistura prevista pela teoria, o direito de rejeitar os que não foram observados, e o direito de, a partir desse momento, atribuir ao objeto uma nova função ondulatória, correspondente ao caso isolado descoberto por ele. Ressaltamos o papel essencial desempenhado pela consciência do observador nessa transição da mistura para o caso isolado. Sem a sua intervenção nunca se poderia obter uma nova função ψ. ... Assim, o que produz uma nova função ψ para o sistema

> durante a medição não é uma misteriosa interação entre a aparelhagem e o objeto [quântico]. Somente a consciência de um 'eu' pode, através da observação, estabelecer uma nova objetividade.”

A criação da realidade pela consciência (RQ # 7) não deve ser confundida com a simples criação da realidade pelo observador (RQ * 2). Os realistas quânticos pertencentes a uma ou outra dessas escolas fazem afirmações discordantes. Qualquer observador, consciente ou não, deverá escolher os atributos a serem medidos (opção métrica quântica), o que determinará as formas ondulatórias em que o sistema quântico será decomposto pela análise. Escolhendo o que será medido, o observador fará o quon adquirir o atributo de posição e não de quantidade de movimento, mas não definirá qual será o valor da posição do quon. A opção métrica quântica pode ser exercida tão eficien-

temente por um computador inanimado quanto por um observador humano. O observador, nesse caso, "cria a realidade" escolhendo *os tipos de atributos que o quon irá possuir.* (Primeiro tipo de criação pelo observador).

A realidade criada pela consciência dá um passo adiante. A consciência seleciona (ou, pelo menos, age como se fosse o local onde a seleção é feita) qual, dentre as muitas possibilidades de posição, é aquela que, de fato, se tornará real. Assim, a opção métrica determina o jogo que será jogado (por exemplo: posição, ao invés de quantidade de movimento); a consciência dá as cartas (esse valor particular da posição). A consciência "cria a realidade" decidindo qual o valor particular do atributo que se materializará. (Segundo tipo de criação pelo observador).

De acordo com a RQ # 7, os atributos dinâmicos, quando não observados, existem sob a forma de uma superposição ondulatória de

possibilidades; somente durante uma observação consciente o universo adquire valores definidos para esses atributos. Segundo esse ponto de vista, uma simples máquina não pode fabricar a realidade, a menos que incorpore algum tipo de percepção análoga à nossa; o problema da medição é resolvido por um fantasma no interior da máquina. Essa realidade quântica sugere que a maior parte do universo, durante a maior parte do tempo, vive em um limbo semirreal de possibilidade, esperando que um observador consciente a torne inteiramente real.

Durante o século XVIII, o crescente sucesso da mecânica de relojoaria de Newton induziu muitos filósofos à crença de que todos os fenômenos, incluindo a vida, a mente e o espírito, poderiam ser afinal explicados como exemplos de maquinaria complexa. George Berkeley, bispo de Cloyne, no sul da Irlanda, revoltado contra o materialismo científico, combateu-o com fortes argumentos filosóficos

próprios. Em sua opinião, a mente não é uma forma de matéria, mas exatamente o oposto: a matéria nem mesmo existe, a não ser como a percepção de alguma mente. A existência absoluta pertence somente às mentes — a mente de Deus, as mentes dos homens e de outros seres espirituais. Todas as outras formas de existência, incluindo a matéria, a luz, a Terra e as estrelas, só o são porque alguma mente toma consciência delas. Na filosofia de Berkeley — apelidada de "idealismo" porque enfatiza a primazia das ideias sobre as coisas — nada existe senão a mente e aquilo que é percebido por uma mente. Esse est percipi (S e r é ser percebido) era o lema do bispo irlandês com respeito à matéria: "Todos esses corpos que compõem a poderosa estrutura do mundo não possuem qualquer existência sem uma mente."

O idealismo quântico não vai tão longe quanto Berkeley foi. Segundo a Realidade Quântica # 7, todos os quons e seus atributos

estáticos gozam da existência absoluta, estejam ou não sendo observados. Somente os atributos dinâmicos de um quon, incluindo os principais atributos externos — posição e quantidade de movimento — são criados pela mente. Desse modo, todas as entidades "que compõem a poderosa estrutura do universo" certamente existem sem a intervenção da mente, mas, até que alguém de fato as observe, essas entidades não possuem lugar ou movimento definidos. O estranho status existencial dos quons não observados é o tema da nossa oitava realidade quântica.

Realidade Quântica # 8: O mundo duplo de Werner Heisenberg. A despeito das exóticas visões da realidade quântica que dançam em suas cabeças, a maioria dos físicos admite que os resultados das medições são verdadeiramente reais. Como as pessoas comuns (mas não como alguns filósofos), os físicos não podem

negar a evidência dos seus sentidos. A indubitável realidade dos resultados das medições constitui uma rocha sólida onde se pode fundamentar uma ciência empírica, ou de onde se pode partir em viagens especulativas na direção da realidade profunda.

Na maioria das realidades quânticas, o ato de medir não revela, passivamente, alguns atributos preexistentes das entidades quânticas, mas, ativamente, dá ao "que realmente está lá" uma forma compatível com a experiência comum. Um dos principais fatos quânticos da vida é o de que nós transformamos radicalmente tudo o que observamos. O legendário rei Midas nunca sentiu o contato da seda ou de uma mão humana, pois tudo o que tocava se transformava em ouro. Os homens estão presos a um dilema semelhante ao do rei Midas: não podemos sentir diretamente a textura da realidade porque tudo o que tocamos se transforma em matéria.

Dentre as realidades quânticas anteriores,

várias investigam o detalhe especial que faz uma interação comum se tornar uma medição (instrumento macroscópico, observador capaz de fazer um registro, espectador consciente, etc.), mas pouco foi dito a respeito do que caracteriza o estado não medido. Como a maior parte da realidade, durante a maior parte do tempo, se encontra nessa condição de não medida, que a teoria quântica representa por uma superposição de possibilidades que não sofreu o colapso, a falta de uma descrição deixa quase todo o universo (tudo aquilo que não esteja sendo correntemente medido) envolto em mistério.

Werner Heisenberg foi um dos poucos físicos que tentaram descrever em termos não matemáticos o "mundo em si", aquela inocente existência que as entidades quânticas desfrutam antes de serem submetidas a uma medição. A descrição de Heisenberg não é nenhum modelo de realidade plenamente desenvolvido, mas apenas a tentativa de um homem para tra-

duzir, em linguagem comum, a essência da realidade profunda representada por uma onda θ.

Heisenberg estava alerta para as dificuldades que encontraria ao tentar decrescer com palavras o mundo quântico. "Os problemas de linguagem, são, aqui, realmente sérios", ele admite. "Queremos, de algum modo, falar sobre a estrutura dos átomos e não apenas sobre os 'fatos' — gotículas de água numa câmara de neblina, por exemplo. Mas não podemos falar de átomos em linguagem comum." Heisenberg não permitiu, contudo, que essa dificuldade o deixasse mudo, e descobriu que algumas palavras são melhores do que outras para a descrição do mundo não medido.

A teoria quântica, segundo a interpretação de Copenhague, representa o mundo de duas maneiras diferentes: a experiência do observador é expressa na linguagem clássica das realidades, ao passo que o domínio quântico não medido é representado por uma superposição

ondulatória de possibilidades. Heisenberg propõe que tomemos essas representações, literalmente, como um modelo para as coisas como elas realmente são.

Assim, de acordo com a dupla visão de Heisenberg, o mundo não medido é realmente a sua representação feita pela teoria quântica: uma superposição de meras possibilidades (Heisenberg chamava-as de *potentia*), tendências de ação não realizadas, aguardando o momento mágico da medição que conferirá a uma dessas tendências um estilo mais concreto de existência, que nós, homens, experimentamos como sendo a realidade.

Assim como o ruído do tráfego não contém tubas nem pianos, mas pode ser analisado em termos de formas ondulatórias de tuba ou piano, seria também um erro imaginar que o mundo de *potentia* de Heisenberg consista de possibilidades definidas e preexistentes de determinados cursos de ação. A superposição não é

isso. As possibilidades latentes em uma determinada onda mandatária surgem somente num contexto de medição definido. Enquanto não exercer a sua opção métrica quântica, o observador não pode se referir a uma superposição de possibilidades definidas. O mundo de *potentia* de Heisenberg não está vazio apenas de realidades; mesmo as suas possibilidades, na falta de uma situação de medição, não estarão tão bem definidas quanto, digamos, as possibilidades clássicas do jogo de dados.

A noção de *potentia,* de Heisenberg, representa uma nova modalidade de existência física localizada "a meio caminho entre a ideia do evento e o evento real". Até ser observada, a entidade quântica deverá ser considerada "menos real" do que a mesma entidade quando observada. Por outro lado, uma entidade quântica não observada possui "mais realidade" do que aquela que se pode atribuir aos objetos comuns, porque conserva in potentia uma quantidade de

atributos contraditórios inacessíveis a qualquer entidade plenamente realizada. "Nas experiências que envolvem eventos atômicos temos que lidar com coisas e fatos, com fenômenos que são tão reais quanto qualquer fenômeno da vida diária", diz Heisenberg. "Porém, os átomos e as partículas elementares não são tão reais; eles formam um mundo de potencialidades ou possibilidades e não de coisas e fatos."

O universo semirreal de *potentia*, de Heisenberg, faz lembrar certos pontos de vista orientais desenvolvidos em contextos muito afastados da física quântica:

Este mundo flutuante não passa de um fantasma Um fumo momentâneo.

Embora fantasmagórico e transitório, o oceano de potentia de Heisenberg, luzindo fracamente, é a única base de tudo o que vemos em torno de nós. O universo visível inteiro, que

o bispo Berkeley denominou "a poderosa estrutura do mundo", repousa afinal sobre um estranho tipo quântico de ser, não mais substancial do que uma promessa.

REPRISE DA REALIDADE QUÂNTICA

Numerosos físicos utilizam a teoria quântica como uma mera receita para calcular resultados, e não se preocupam com a "realidade". No entanto, é difícil acreditar que essa teoria possa sertão eficaz sem corresponder, de algum modo, à maneira como as coisas realmente são. Como na estória do cego e do elefante, em que cada pessoa imagina um animal diferente, dependendo da parte do animal em que está tocando, essas oito realidades quânticas são produzidas por diferentes físicos, cada um considerando seriamente uma parte da teoria quântica e identificando-a com a "realidade real" que jaz sob as aparências.

Bohr, por exemplo, considerou seriamente o princípio da incerteza, utilizando-o para argumentar que o quon não possui atributos dinâmicos próprios. Os chamados atributos de um quon residem na relação entre a entidade e um instrumento de medida "clássico".

Os crentes da realidade criada pelo observador consideram seriamente a opção métrica quântica-, exercendo essa poderosa opção, o observador determina quais os tipos de atributos que as entidades quânticas aparentemente possuirão.

A Realidade Quântica # 3 (o todo indiviso) considera seriamente o embaralhamento das fases como sinal de uma conectibilidade física real (a conexão quântica) que liga instantaneamente cada quon a todos os outros.

Everett, em sua interpretação dos mundos múltiplos, considera seriamente o problema da medição quântica, e resolve-o declarando que o colapso da função ondulatória é uma ilusão

originada na incapacidade humana de experimentar plenamente a realidade; somos inexplicavelmente cegos para tudo, exceto para um único ramo de uma viçosa árvore de universos coexistentes.

Os lógicos quânticos (RQ # 5) veem os atributos incompatíveis como o fato quântico central: torna-se necessária uma nova maneira de raciocinar, na qual o estranho comportamento dos atributos quânticos pareça perfeitamente natural.

Os neorrealistas (RQ # 6) acreditam que o caráter superficial comum de todos os fatos quânticos (efeito Cinderela) — todas as experiências devem ser necessariamente descritas em termos clássicos — indica claramente que a realidade é, também, comum.

Os crentes da realidade criada pela consciência consideram seriamente o problema da medição quântica e concluem que em nenhum ponto da mera substância quântica existe uma

localização lógica para o colapso da onda mandatária: só a mente do observador pode preencher os requisitos necessários a essa localização.

O universo duplo de Werner Heisenberg (RQ # 8) admite a representação das entidades quânticas por ondas mandatárias literalmente como superposições de possibilidades. Os atributos quânticos não medidos são exatamente o que a teoria quântica diz que eles são: possibilidades não realizadas.

Devido ao efeito Cinderela — o insistente caráter comum dos fatos quânticos — não podemos experimentar diretamente nenhuma dessas estranhas realidades quânticas (com exceção do neorrealismo). Embora façam afirmações diferentes, todas essas realidades preveem exatamente os mesmos fatos. Não há, no presente, qualquer maneira experimental de decidirmos por uma dessas visões alternativas do verdadeiro modo de ser do mundo.

Quando meu filho me faz a pergunta "De que é feito o mundo?", respondo confiantemente que, bem no fundo, a matéria é feita de átomos. No entanto, quando ele quer saber como são os átomos, não sou capaz de responder, apesar de ter passado a metade da minha vida examinando essa questão. O quanto eu me sinto desonesto — como "especialista" em realidade atômica — sempre que reproduzo para as crianças em idade escolar a conhecida figuração planetária do átomo; mesmo no tempo de seus avós, já se sabia que aquilo era uma mentira.

Os físicos não podem explicar os átomos para seus filhos, não porque sejam ignorantes, mas porque sabem demais. O comportamento dos átomos já não é um mistério. Os teóricos quânticos podem, confiantemente, calcular o resultado de qualquer experiência atômica concebível. Contudo, como vimos, o preço que os físicos pagaram pelo notável poder previsivo

da teoria quântica é a sua incapacidade de formar, em linguagem simples, uma imagem do mundo atômico.

Trinta anos após a publicação dos Die Grundlagen de von Neumann (1932), a questão da realidade quântica provocou calorosos debates entre filósofos e físicos, mas pouco progresso foi feito no sentido de solucionar o problema relativo ao tipo de mundo em que vivemos. Porém, em 1964, um físico chamado John Bell demonstrou um importante teorema que nos proporcionou uma nova percepção da realidade profunda.

11. O Paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen

> Só podemos escapar dessa conclusão admitindo que a medição de A altera (telepaticamente) a situação real de V, ou negando a existência de situações reais independentes, tais como as de objetos espacialmente afastados. As duas alternativas são, para mim, inteiramente inaceitáveis.
> Albert Einstein

O ponto essencial do teorema de Bell é o seguinte: *nenhum local de realidade pode explicar os resultados de uma determinada experiência.* Em resumo: a realidade é não-local. Antes de examinar o que significa ser "não-local", passemos os olhos nessa experiência especial, denominada

EPR, que constitui a base efetiva da importante conclusão a que Bell chegou. Como tantas outras inovações da física do século XX, a experiência EPR foi concebida por Albert Einstein.

Embora tenha ajudado a montar a teoria quântica, Einstein nunca se satisfez com ela. Ele não gostava do seu intrínseco caráter aleatório ("Não posso acreditar que Deus jogue dados com o universo"), porém, acima de tudo, o que mais o desgostava era o fato de que a teoria quântica (na interpretação de Bohr e Heisenberg) indica que a realidade é criada pelo observador. "Não posso imaginar", disse Einstein, "que um camundongo possa alterar drasticamente o universo, meramente olhando para ele." Einstein acusava Bohr e Heisenberg de estarem tentando recolocar o homem (e o camundongo) no centro do cosmo, de onde Copérnico os expulsara há cerca de quinhentos anos. "A crença num mundo externo independente da percepção subjetiva", insistia Einstein, "é a ba-

se de todas as ciências naturais."
Fig. 11.1. Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, criadores do paradoxo EPR, que visa a demonstrar a existência de “elementos de realidade" não incluídos na teoria quântica.

Bohr respondia comparando Einstein aos críticos da sua própria teoria da relatividade, e ressaltava que, graças a Einstein, os físicos tinham conseguido perceber que o tempo e o espaço não são absolutos, e sim relativos, dependentes do estado de movimento do observador. Na teoria quântica, simplesmente seguimos essa linha de pensamento um passo adiante e reconhecemos que a própria realidade (pelo menos os seus atributos dinâmicos) também depende do observador. Por que é tão difícil para Einstein, imaginava Bohr, aceitar essa extensão natural de suas próprias ideias?

"Uma boa anedota não deve ser repetida", gracejava Einstein.

Niels Bohr e Albert Einstein debateram a

questão da realidade quântica enquanto viveram; Einstein falhou em suas tentativas de atacar de frente a teoria quântica e, relutantemente, concordou com Bohr sobre o fato de que a teoria quântica descreve corretamente todas as experiências atualmente concebíveis — uma conclusão que até hoje não foi contestada. Einstein passou, então, a criticar a teoria quântica sob o aspecto de que ela estaria *incompleta*.

Albert Einstein

Boris Podolsky

Nathan Rosen

Fig. 11.1. Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, criadores do

A teoria quântica pode ser suficiente para explicar as experiências, confessou Einstein, mas experiências são apenas uma parte do que acontece no mundo. Porque faz somente previsões estatísticas, a teoria quântica não pode evitar que fiquem de fora certos "elementos de realidade" que uma teoria do mundo, mais adequada, deveria necessariamente incluir.

Niels Bohr, por outro lado, afirmava que, produzindo apenas previsões estatísticas, a teoria quântica é, ainda assim, completa. A indeterminação presente na teoria quântica é uma virtude, e não uma fraqueza, porque corresponde à indeterminação que realmente existe no mundo. Não seria sensato procurar uma descrição precisa de um mundo impreciso; essa precisão, no lugar errado, está fadada a errar o alvo.

O melhor argumento de Einstein, para mostrar que a teoria quântica está incompleta, foi

produzido sob a forma de uma experiência intelectual envolvendo dois quons correlacionados. Ele imaginou essa experiência em Princeton, em 1935, com o auxílio de dois físicos americanos: Boris Podolsky, originário da Rússia meridional, e Nathan Rosen, nascido no Brooklyn. A experiência original de Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) diz respeito a dois elétrons com *quantidades de movimento correlacionadas,* mas os físicos de hoje repetem o argumento da EPR utilizando a experiência conceitualmente mais simples, de David Bohm, envolvendo dois *fôtons com polarizações correlacionadas.*

A EXPERIÊNCIA EPR

No Capítulo 8 comparamos um feixe luminoso a uma série de bolas (fótons) lançadas pelo arremessador no jogo de beisebol. O atributo polarização de duplo valor do fòton foi compara-

do a um batedor que segura o bastão num certo ângulo 0 e faz um ponto ou perde um ponto. No laboratório, a polarização do fóton é medida com um cristal de calcita que divide o raio luminoso em dois canais, um alto e um baixo, dependente de estarem os seus fótons polarizados, respectiva mente, ao longo do eixo ótico da calcita ou em ângulo reto com esse eixo.

A experiência EPR é apenas um pouco mais complicada do que esse jogo de bola com dois jogadores. A fonte EPR emite *pares de fótons* (um fóton Verde e outro Azul) que se deslocam em direções opostas, para encontrarem *dois detectores afastados* (denominados, também, Verde e Azul), onde poderá ser medida a polarização *P(ψ)* desses fótons, num determinado ângulo 0. Para figurar esse arranjo EPR, imaginemos um arremessador que lança *duas boias ao mesmo tempo*. Primeiramente, ele atira uma bola Verde na direção da base do batedor; em seguida, sem quebrar o ritmo, ele se

volta e dispara uma bola Azul na direção da segunda base, onde está postado um segundo batedor.

Como no jogo anterior, os batedores postados na primeira e na segunda base podem medir a "polarização" das bolas, segurando os seus bastões num determinado ângulo. Um ponto ganho mostra que a bola está polarizada no ângulo do bastão; um ponto perdido corresponde à polarização em ângulo reto com o bastão.

O arremessador dispara um par de bolas, descansa um momento, e lança outro par. Para cada par de bolas, o jogador Verde mede a polarização da sua bola Verde num determinado ângulo Verde, enquanto que o jogador Azul mede a polarização de sua bola Azul num determinado ângulo Azul. Para se entender a experiência EPR não é necessário saber-se o que é, realmente, polarização — o que a polarização *realmente é* constitui um mistério, também, para os físicos — mas é necessário que se conheçam os

resultados particulares de cada par de medições da polarização. Codificado no padrão apresentado por esses resultados está o ponto essencial do paradoxo EPR, bem como o cerne do teorema de Bell, que discutiremos no capítulo seguinte.

Os pares de fótons EPR são lançados em uma condição especial: eles deixam a fonte de luz num estado particular de embaralhamento de fases denominado "estado de polarização paralela". Por estarem as fases embaralhadas, a fase de cada fóton depende do que está fazendo o outro fóton. Consequentemente, nenhum desses fótons está representado por uma forma ondulatória definida; donde (de acordo com a teoria quântica) nenhum desses fótons possui uma polarização definida.

No que concerne à observação, não possuir polarização definida significa que nenhuma medida de polarização dará sempre o mesmo resultado. De fato, para esse estado particular

de dois fótons, a luz Verde e a luz Azul estão completamente não polarizadas — esta é a indeterminação máxima possível de um atributo de dois valores. Para cada fóton, em qualquer ângulo 0, uma medição da polarização *P(ψ)* dá 50% de resultados no canal alto e 50% no canal baixo, resultados esses que ocorrem ao acaso, como no jogo de cara ou coroa.

Embora *cada fóton por si só* não possua uma onda mandatária definida, *o estado dos dois fótons como um todo* é representado por uma onda definida, o que significa que certos *atributos das duas partículas* (pertinentes simultaneamente aos fótons Verde e Azul) possuem um valor definido. Para fótons no estado de polarização paralela, um desses atributos definidos é a *polarização parelha* dos fótons.

Para se medir a polarização parelha *PP(ψ)* num determinado ângulo 0, ajusta-se as calcitas Verde e Azul no mesmo ângulo ψ e observa-se os valores de polarizações (alto e baixo). Corno

a polarização propriamente dita, o atributo *PP* pode assumir somente dois valores: os dois fótons podem ter o mesmo *P* ("acerto") ou terem *P* opostos ("erro").

Tanto a teoria quântica como os fatos quânticos confirmam que, para fótons no estado de polarização paralela, o valor de *PP(ψ) em todos os ângulos* 0 é sempre o mesmo, ou seja, "acerto". Isso quer dizer que, se medirmos a polarização Verde num ângulo 0 e a polarização Azul no mesrno ângulo, ambas serão sempre a mesma. Além disso, a polarização de V será a mesma de A, independentemente de quanto os fótons se afastem um do outro, e de qual polarização seja medida em primeiro lugar. Por exemplo, pode-se medir a polarização do fóton Verde imediatamente após ele ter deixado a fonte e medir o fóton Azul um ano mais tarde (quando estiver a uma distância de um ano-luz da fonte): as polarizações de ambos serão idênticas.

De acordo com a teoria quântica, no estado

de polarização paralela, cada fóton, isoladamente, não possui polarização definida. Contudo, a dos fótons Verde e Azul juntos é definida: será "acerto" em qualquer direção. Os atributos polarização de fótons não medidos, neste estado, fazem lembrar os atributos de gêmeos idênticos antes da concepção. Os atributos de cada gêmeo (sexo, cor do cabelo, etc.) não estão decididos, mas a condição de seus *atributos parelhos* já é conhecida: o mesmo para ambos. Por essa razão, chamamos o estado de polarização paralela de "estado geminado".

Em termos de dois jogadores de beisebol, os resultados de uma longa série de jogos contra um arremessador que sempre lança pares de bolas no estado geminado serão os seguintes:

1. Seja qual for o ângulo ψ em que um ou outro segure o bastão, ambos obterão um resultado meio a meio de pontos ganhos e pontos perdidos.

2. Se ambos concordarem previamente em segurar os bastões no mesmo ângulo ψ [chamamos a isso "medir o atributo *PP(ψ)"], o* que acontecer à bola de um dos jogadores (ponto ganho ou perdido), acontecerá à bola do outro jogador.

É A TEORIA QUÂNTICA UMA DESCRIÇÃO COMPLETA DA REALIDADE?

Uma diferença entre gêmeos humanos e um par de fótons rio estado geminado consiste em que, antes da concepção, os gêmeos humanos não existem, enquanto que, antes da medição os fótons já existiam. Sabemos que eles foram emitidos de suas fontes num determinado momento e que estão se deslocando com uma certa velocidade na direção de seus respectivos detectores.

Com respeito a um par de fótons no estado

geminado, Einstein propôs a seguinte questão: "É a polarização do fóton Verde, após este ter sido emitido, mas antes de ser medido, *realmente indefinida,* como exige a interpretação de Bohr da teoria quântica, ou é, como acontece no útero aos gêmeos idênticos, *realmente definida* mas desconhecida?" Em outras palavras: "Nossa incerteza concernente às polarizações não observadas é uma questão de ignorância *quântica* ou *clássica?"*

Segundo Bohr, a polarização do fóton Verde nem mesmo existe, antes de a medirmos. Os chamados atributos do fóton Verde não pertencem ao fóton em si, mas residem parcialmente no "arranjo experimental global". Como a posição do arco-íris, a polarização é um *atributo relacionai* e só passa a existir quando o observador Verde decide como irá dispor sua aparelhagem no local Verde (ou, possivelmente, em qualquer outro local). Não tem sentido supor que, antes da medição, o fóton Verde tenha al-

guma polarização definida. Einstein, ao contrário, afirma que o fóton Verde não só tem, de fato, uma polarização definida em alguma direção, como tem polarizações definidas *em todas as direções*.

Para dar ênfase à diferença entre Bohr e Einstein, imaginemos que o jogador Azul se desloque para perto da elevação onde fica o arremessador, de modo que ele pegue a sua bola Azul antes que o jogador Verde pegue a bola Verde. Suponhamos que ele segure o seu bastão a zero grau (verticalmente) e marque um ponto, o que significa que o seu fóton está polarizado vertical mente. Giramos, agora, nossa câmara para a primeira base, onde os espíritos de Einstein e Bohr estão discutindo o status de realidade do fóton Verde, ainda a ser medido, e que presentemente está se deslocando com a velocidade da luz na direção do batedor Verde. A fim de conceder a esses dois grandes homens algum tempo para o debate, imaginemos que a

costumeira passagem do tempo seja temporariamente suspensa.

BOHR: Quando afirmo que a teoria quântica está completa, quero dizer que ela diz tudo aquilo que é possível dizer com respeito à realidade daquele fóton Verde. O que não estiver na teoria, não estará, também, no fóton.

EINSTEIN: O que diz, então, a teoria, a respeito desse fóton Verde que se aproxima do batedor Verde?

BOHR: Em primeiro lugar, considerando que o jogador Azul já mediu um fóton polarizado verticalmente, e acrescentando-se o fato de que esse arremessador só lança pares de fótons no estado geminado, a teoria quântica prevê que, se o jogador Verde resolver segurar verticalmente o seu bastão, certamente marcará um ponto; e mais, ela prevê ainda que, se ele segu-

rar horizontalmente o bastão, certamente perderá um ponto.

EINSTEIN: Concordo com você no que concerne à previsão da teoria quântica para os casos em que o jogador Verde fizer uma medida de polarização horizontal ou vertical. Mas o que acontecerá se o jogador Verde segurar o seu bastão em algum outro ângulo?

BOHR: Para outros ângulos do bastão Verde, diferentes de zero e de noventa graus, a teoria quântica não fornece resultados certos, mas somente *a probabilidade* de ser marcado um ponto. Por exemplo, se o jogador Verde segurasse o seu bastão a 45°, as suas chances de marcar um ponto seriam de 50%.

EINSTEIN: Certo. A teoria quântica de fato fornece somente previsões estatísticas para os casos de ângulos intermediários. Ao que pare-

ce, concordamos no que diz respeito às previsões da teoria e aos fatos concernentes ao assunto, i.e.: a teoria nunca fez uma única previsão incorreta. Concordamos, como diria Kant, sobre as aparência e sobre a teoria. Porém, meu caro Bohr, o que você está querendo dizer sobre a *realidade* desse fóton Verde, magicamente suspenso no ar em frente a nós?

BOHR: Por acreditar que a teoria quântica descreve completamente todas as situações físicas, devo dizer que, antes de ser efetivamente medido, esse fóton só possui uma polarização definida nas direções vertical e horizontal, mas não em outras direções. Falar de uma polarização definida, em quaisquer outras direções, não teria nenhum sentido. Assim, digo que, na realidade, esse fóton Verde não possui atributos de polarização, exceto, talvez, nesses ângulos particulares.

Mesmo nesses ângulos especiais, para os

quais a teoria quântica fornece determinados resultados, não estou inteiramente convencido de que esses resultados representam um atributo definido pertencente somente ao fóton. Acredito que todos os atributos são criações conjuntas do fóton e do instrumento de medida, e não pertencem a um ou ao outro.

EINSTEIN: Com respeito a esse assunto de algo ser, ou não, completo... Como você sabe, meu amigo, não posso refutar a sua opinião de que a teoria quântica constitui uma teoria completa dos fenômenos; ela de fato parece descrever corretamente os resultados de todas as experiências que a minha pobre cabeça tem sido capaz de imaginar. Mas não compartilho a sua fé em que a teoria quântica seja uma teoria completa da realidade. Acredito na existência de certos elementos de realidade desse mundo, que não estão descritos pelo formalismo quântico. No caso desse fóton Verde, por exemplo,

digo que ele possui um atributo polarização definido para todos os ângulos possíveis, e não apenas para as direções vertical e horizontal.

BOHR: Não, meu amigo, você está enganado. Exceto, talvez, em certas situações especiais onde o resultado não é uma questão de sorte - tais como as direções vertical e horizontal, no presente caso - a polarização do fóton é produzida pelo arranjo experimental global, e não é inerente ao fóton em si, independentemente de um contexto particular de medição.

EINSTEIN: Perdoe-me, Bohr, mas nunca fui capaz de entender a sutileza do seu raciocínio neste assunto. Na verdade, para situações como esta, de um jogo de beisebol com bolas no estado geminado, eu e meus colegas Podolsky e Rosen descobrimos um argumento simples que nos mostra que esse fóton Verde, pairando à nossa frente, possui atributo polarização defi-

nido (mas desconhecido) *em todos os ângulos*. Permita-me descrever para você esse argumento.

Nosso raciocínio depende de uma certa pressuposição plausível, que os físicos chamam hoje de "pressuposição de localidade": admitimos que a situação real efetiva do fóton Verde, após deixar a fonte, não é afetada pela escolha do jogador Azul quanto ao modo de segurar o bastão. Em outras palavras, admitimos que *a postura de rebate do jogador Azul não afeta o fóton Verde*. Essa suposição me parece razoável, porque os dois fótons estão se deslocando em direções opostas, com a velocidade da luz. Assim, um fóton não pode ter conhecimento da situação de medição do outro fóton, a não ser através de um sinal mais rápido que a luz.

BOHR: Desconfio dessa pressuposição de localidade, mas, por favor, continue.

EINSTEIN: Eis o nosso argumento. Na presente situação o jogador Azul decidiu segurar o bastão verticalmente e marcou um ponto. Mas se tivesse segurado o bastão em outro ângulo qualquer, digamos, a 45°, ele teria também medido *algo* (um ponto ganho ou um ponto perdido), que desconhecemos. Como esse par de fótons está no estado geminado, sabemos que o fóton Verde estaria obrigado a mostrar a mesma polarização que o jogador Azul detectou a 45°. Do mesmo modo, o jogador Azul poderia ter segurado o bastão em um ângulo *X* qualquer e teria obtido uma determinada polarização; o fóton Verde teria, obrigatoriamente, essa mesma polarização no ângulo *X*.

Se o fóton Verde possui, necessariamente, uma polarização definida para cada escolha de medição feita pelo jogador Azul, e se (em virtude da pressuposição de localidade) a escolha de medição do jogador Azul não afeta fisicamente o fóton Verde, então *o fóton Verde já deve-*

ria possuir uma polarização definida para cada ângulo — polarizações que existem independentemente da efetiva escolha do jogador Azul.

Assim, acreditamos ter demonstrado que, antes de atingir o bastão Verde, esse fóton Verde já terá "decidido" como agir, seja qual for a escolha do jogador Verde quanto ao modo de segurar o bastão. Esse fóton Verde deverá possuir uma espécie de lista "bate/passa" que lhe diga o que fazer, para todos os ângulos do bastão. A teoria quântica, por outro lado, certamente não reconhece nenhuma lista desse tipo. Ela considera que, com exceção das direções horizontal e vertical, esses resultados são "aleatórios", inteiramente desconhecidos, exceto num certo sentido probabilístico. A teoria quântica é, portanto, "incompleta", porque deixa de fora alguns atributos — essa lista, por exemplo — que esse fóton parece possuir.

BOHR: Seu argumento é inteligente, mas não posso aceitar a sua conclusão. É claro que não se trata de questionar a existência de qualquer influência mecânica do bastão Azul sobre o fóton Verde, mas existe essencialmente a questão de uma influência sobre as próprias condições que definem os possíveis tipos de previsão com respeito ao futuro comportamento da luz Verde.

EINSTEIN: Sim, eu me lembro de você ter feito essa mesma afirmação em 1935, em resposta ao nosso artigo original concernente à experiência EPR. Não a entendi, então, e devo confessar que, a despeito do considerável esforço feito para entendê-la, ainda não consigo captar a sutileza do seu pensamento sobre esse assunto.

Como o autor parece ter congelado os nossos intelectos — como fez com aquele fóton Verde ali parado no tempo — conservando as nossas antigas posições filosóficas, responderei

à sua velha citação com duas das minhas, que resumem o meu pensamento a respeito da experiência EPR:

"Somos forçados (através do argumento EPR) a concluir que a descrição quântico-mecânica da realidade física, fornecida pelas funções ondulatórias, não está completa."

"Só podemos escapar dessa conclusão, admitindo que a medição do fóton Azul altera (telepaticamente) a situação real do fóton Verde, ou negando a existência de situações reais independentes, tais como as de objetos espacialmente afastados. As duas alternativas são, para mim, inteiramente inaceitáveis."

Bohr, Einstein e outros numerosos pensadores lutaram para esclarecer o paradoxo EPR mas ninguém conseguia encontrar uma solução aceitável, até que Bell chamou a atenção de todos para a fragilidade da pressuposição de localidade. Olhemos de perto essa pressuposição, tão essencial para o argumento de Einstein, Po-

dolsky e Rosen.

A PRESSUPOSIÇÃO DE LOCALIDADE

A pressuposição de localidade não implica em que *aquilo que acontece* no bastão Verde nada tenha a ver com *o que acontece* no bastão Azul. Como os fótons, ao deixarem a fonte de luz, estão correlacionados, os resultados obtidos nos locais Verde e Azul de medição estarão também correlacionados. A "localidade" implica em que nenhuma ação por parte do jogador Azul (ao detectar o seu fóton Azul) pode afetar o que o jogador Verde vê (quando detecta o seu fóton Verde), A "localidade" implica em que aquilo que acontece na primeira base não é afetado pela maneira adotada pelo jogador Azul para segurar o seu bastão na segunda base.

A pressuposição de localidade é necessária ao argumento EPR porque, embora o observador Azul pudesse ter feito qualquer medida de

polarização à sua escolha, ele só pode, de fato (para um único fóton) ter feito uma medição, uma vez que as polarizações do fóton, em ângulos diferentes, são atributos incompatíveis.

Como um exemplo prosaico do raciocínio EPR, consideremos uma lanchonete (Enrico's Pizza Reale) que venda três tipos de pizzas: siciliana, milanesa e napolitana. Sempre que você encomenda uma pizza no Enrico's, ela chega à sua casa em dez minutos. Como uma pizza leva trinta minutos para assar, você está sabendo que a pizza encomendada devia estar pronta quando você telefonou.

Suponhamos que você encomende uma pizza, à sua escolha, todas as noites (seu dinheiro só dá para uma) e ela é entregue sempre em dez minutos. Você pode concluir que o Enrico tem à mão *os três tipos de pizza*?

Não sem algum tipo de pressuposição de localidade. Você terá de presumir que o Enrico não tem como saber o tipo de pizza que você

vai pedir naquela noite. Podendo descobrir antecipadamente a sua escolha, ele só precisará manter uma pizza quente.

A sua liberdade de escolha a cada noite, mais a "pressuposição de localidade" (sem espiões de pizza), lhe permite inferir, com base em uma série de observações de uma pizza isolada, que o Enrico realmente conserva *todas as três pizzas* prontas para saírem todas as noites. O argumento em favor de polarizações preexistentes é o mesmo de pizzas preexistentes. A liberdade do jogador Azul de escolher uma medição de polarização, acrescida da pressuposição de localidade, permite á EPR inferir que *todas as polarizações* deverão estar simultaneamente presentes no fóton Verde (sob a forma de uma lista de procedimentos "bate/passa") antes que o jogador Verde faça a sua medição.

Consequentemente, no estado geminado, o fóton Verde já sabe secretamente como irá reagir a qualquer medição de polarização que o jo-

gador Verde resolva executar. De acordo com o argumento EPR, *o atributo polarização do fóton Verde não está, de modo algum, indefinido.* A lista bate/passa do fóton Verde especifica a sua polarização para todos os ângulos de medição.

Bohr declara que o fóton Verde, antes de ser medido, está num estado de polarização indefinida; a teoria quântica não reconhece qualquer lista do tipo bate/passa. Porém Einstein, Podolsky e Rosen podem *provar* que uma tal lista existe na natureza. Assim, de acordo com a EPR, a teoria quântica necessariamente está incompleta.

É importante perceber o que a EPR não fez: Einstein, Podolsky e Rosen não descobriram uma situação experimental em que a teoria quântica está efetivamente errada. O que eles descobriram foi um simples argumento lógico (baseado no fato experimental da perfeita correlação de polarizações de um determinado sis-

tema de dois fótons) que *demonstra indiretamente a* existência de atributos do fóton que a teoria quântica deixa de tomar em consideração. Eles então indagam: "Se a teoria quântica é uma teoria completa da realidade, por que ela omite esses atributos?"

O que está em jogo não é ser a teoria quântica uma teoria completa dos *fenômenos* (explicando corretamente todas as medições atualmente concebíveis), mas ser uma teoria completa da *realidade* (explicando corretamente tudo o que existe, mensurável ou não). Numerosas *refutações* do argumento EPR meramente demonstram que a teoria quântica descreve corretamente todas as medições de polarização no estado geminado. Einstein, Podolsky e Rosen não contestam a competência da teoria quântica para descrever os fenômenos; eles afirmam, contudo, terem demonstrado a existência de certos "elementos de realidade" (nas palavras de Einstein), partes do mundo *não observáveis*

diretamente, que a teoria quântica simplesmente omite.

A prova EPR dá àqueles que acreditam que só é real aquilo que pode ser observado, uma oportunidade de testarem as suas convicções. Para esses realistas que repudiam a falta de senso, o argumento EPR deve estar errado porque visa a demonstrar a existência de uma realidade não passível de observação. Contudo, mesmo aqueles que, de antemão, estavam convencidos do erro de Einstein, Podolsky e Rosen, acharam surpreendentemente difícil apontar a falha do seu raciocínio. Centenas de artigos foram publicados a respeito do "paradoxo EPR”. Há trinta anos os físicos e filósofos vêm quebrando a cabeça com essa prova, sem refutarem a sua lógica ou lançarem mais luz sobre os "elementos de realidade" alegados por Einstein, Podolsky e Rosen.

Em 1964, o longo impasse foi quebrado pelos esforços do físico teórico John Bell.

12. Teorema da Interconectabilidade de Bell

> A magia transmissível está baseada na pressuposição de que as substâncias que estiverem, uma vez, ligadas, adquirem uma ligação continuada; assim, uma ação exercida sobre uma unidade menor afetará a unidade maior, mesmo que elas estejam fisicamente separadas.
> Sir James Frazer

John Stewart Bell nasceu e cresceu em Belfast, na Irlanda do Norte. Atualmente é um dos físicos teóricos do CERN (o grande centro acelerador de Genebra, financiado pelos países da Europa Ocidental), onde se especializou em física das partículas elementares. Em 1964, quando em licença-prêmio, Bell resolveu investigar

a questão da realidade quântica, que o fascinara ainda nos seus dias de estudante.

Bell começou pelo exame da prova de von Neumann, que demonstra a impossibilidade do neorrealismo. Segundo von Neumann, o mundo não pode ser constituído de objetos comuns que possuem atributos dinâmicos próprios. Bell verificou que, embora exclua os objetos cujos atributos se combinam "de maneira razoável", essa prova não exclui os objetos que podem alterar os seus atributos reagindo ao ambiente que os cerca. Essa abertura na prova de von Neumann foi o que permitiu a Bohm, de Broglie e outros neorrealistas construírem modelos explícitos de realidade quântica baseados em objetos comuns; todos esses modelos contêm objetos cujos atributos são sensíveis às circunstâncias.

nquanto preparava um artigo crítico sobre a prova de von Neumann. Bell interessou-se pelas provas de impossibilidade em geral e imaginou

a possibilidade de ser construída uma prova que, de modo conclusivo, excluísse qualquer modelo de realidade que possuísse determinadas características físicas. Ele próprio conseguiu criar uma prova semelhante, que rejeita todos os modelos de realidade que possuem a propriedade de "localidade". Desde então, essa prova ficou conhecida como *teorema de Bell.* Ela declara que nenhum modelo local de realidade pode dar suporte aos fatos quânticos. O teorema de Bell diz que a realidade deve ser necessariamente não-local.

Numa carta dirigida ao autor, John Bell relata a sua descoberta: "Já faz muito tempo que sou fascinado pela experiência EPR. Ela contém, ou não, um paradoxo? Impressionaram-me profundamente as restrições de Einstein a respeito da teoria quântica e sua opinião de que ela seria uma teoria incompleta. Por razões diversas, aquele era para mim o momento oportuno para atacar de frente o problema. O resul-

tado foi o inverso do que eu pensara. Mas fiquei maravilhado — numa área onde tudo era indefinido e obscuro, eu encontrara algo sólido e claro".

A estrutura da prova de Bell é a seguinte. Para uma certa classe de experiências com dois quons (a experiência EPR e suas variações), Bell *pressupõe a* existência de uma realidade local. Com um pouco de aritmética, ele mostra que essa pressuposição de localidade conduz diretamente a uma inequação (a inequação de Bell), que deve ser satisfeita pelos resultados experimentais. Contudo, quando efetuadas, essas experiências sempre contrariam a inequação de Bell. Donde se deduz que a pressuposição de uma realidade local está errada. Conclusão: qualquer realidade que dê suporte à experiência EPR deverá ser necessariamente não-local.

O QUE É UMA INTERAÇÃO LOCAL?

A essência de uma interação local é o contato direto — tão básico quanto um murro no nariz. O corpo A afeta *localmente o* corpo B quando ele toca no corpo B, ou toca em algo que toca o corpo B. Um conjunto de engrenagens constitui um mecanismo tipicamente local. O movimento é transmitido de uma roda dentada para outra, seguindo uma cadeia ininterrupta. Se rompermos a cadeia, retirando uma engrenagem, interromperemos o movimento. Sem algo que lhe sirva de meio, uma interação local não cruza o espaço aberto.

Inversamente, a essência da não-localidade é a ação a distância, sem mediações. Uma interação não local salta de um corpo A para o corpo B sem tocar em nada entre eles. O ferimento vodu é um exemplo de interação não local. Quando o praticante do vodu espeta um alfinete no boneco, o alvo distante é (supostamente) ferido instantaneamente, embora nada se desloque,

realmente, do boneco para a vítima. Os crentes do vodu afirmam que uma ação ***aqui*** produz um efeito lá, e isso é tudo. Uma interação não local pode cruzar facilmente o vazio, sem o auxílio da mediação.

A natureza desregrada da ação não mediata levou os físicos, de Galileu a Gell-Mann, a rejeitarem as interações não locais como base para a explicação do que acontece no mundo. Ninguém expressou tão veementemente o desagrado dos físicos pelas interações não locais do que Sir Isaac Newton:

"Que um corpo possa agir sobre outro a distância, no vácuo, sem a mediação de alguma coisa... é para mim um tão grande absurdo que não creio possa haver alguém que, possuindo uma competente faculdade de pensar sobre assuntos filosóficos, seja jamais capaz de cair nesse logro."

Declarada a sua antipatia pelas forças não-locais, Newton se viu um tanto embaraçado

com a sua própria teoria da gravidade. Se uma força não-local é "um tão grande absurdo", como pode a força gravitacional do sol atravessar milhões de quilômetros de espaço vazio para manter a Terra em sua órbita? A respeito da real natureza da gravidade, Newton sabiamente controlou a sua língua, declarando: *“Hypotheses non fingo"* — "Não construo hipóteses".

A crença de Newton em forças estritamente locais foi defendida por seus sucessores, que explicaram a gravidade em termos de um *conceito de campo*. O espaço entre o sol e a Terra não está vazio, dizem os físicos de hoje; ele está preenchido por um campo gravitacional que exerce forças sobre todos os corpos com os quais entra em contato. O moderno conceito de campo nos permite considerar a gravidade como uma interação estritamente local, embora ela atue através da imensidão do espaço. A massa do sol cria um campo de gravidade; esse campo atrai a Terra servindo de meio para a in-

teração sol-Terra.

Atualmente, os físicos compartilham a crença de Newton, de que o mundo está unido por conexões estritamente locais. Todas as interações conhecidas podem ser explicadas em termos de somente quatro forças fundamentais (forte, fraca, eletromagnética a gravitacional). Em todos os casos, essas forças atuam por intermédio de campos. Como a teoria quântica descaracterizou a outrora nítida distinção entre partícula e campo (ambos são, agora, substância quântica) podemos, igualmente, dizer que essas forças locais atuam por intermédio de uma permuta de *partículas.* Assim, o sol atrai a Terra (e vice-versa) através do campo gravitacional ou através de uma permuta de grávitons (o "aspecto partícula" do campo gravitacional). Na realidade, a gravidade (bem como as outras três forças fundamentais) não é transportada pelas partículas nem pelos campos, mas por algo que é formado de ambos, um inato inter-

mediário quântico, cuja mediação torna estritamente locais todas as forças da natureza.

Embora o conceito de localidade não o exija rigorosamente, quase todas as forças perdem intensidade quando nos afastamos de suas fontes. Uma força local pode, concebivelmente, conservar-se constante ou mesmo crescer com o afastamento da fonte (a força de uma mola distendida, por exemplo, aumenta com a distância). No entanto, as quatro grandes forças que mantêm o mundo unido *decrescem com a distância — a* gravidade e o magnetismo caem na razão do quadrado da distância; as forças forte e fraca caem consideravelmente mais depressa.

A mais severa limitação imposta às interações locais se refere à velocidade com que se deslocam. Quando movemos um objeto A, distendemos o campo que lhe está anexado. Esse campo se deforma inicialmente junto ao objeto A; em seguida a deformação do campo se

desloca para regiões distantes. A teoria especial da relatividade, de Einstein, restringe a velocidade dessa deformação do campo, estabelecendo que ela deverá ser inferior ou, no máximo, igual à velocidade da luz. Segundo Einstein, nenhum objeto material pode deslocar-se mais rapidamente do que a luz; nem mesmo essa (menos material) deformação do campo pode mover-se com essa velocidade.

As influências não-locais, caso existissem, não deveriam se fazer sentir por intermédio de campos nem por coisa alguma. Quando A se liga a B não-localmente, nada se atravessa no espaço entre eles; nenhuma quantidade de matéria interposta poderá anular a interação.

As influências não-locais não enfraquecem com a distância. Elas são tão potentes à distância de um milhão de quilômetro: quanto à de um milímetro.

As influências não-locais agem instantaneamente. A rapidez de sua transmissão não está

limitada pela velocidade da luz.

Uma interação não-local liga um ponto a outro sem cruzar o espaço, sem enfraquecer e sem demora. Uma interação não-local, em resumo, é *não mediata, não atenuável* e *instantânea*.

A despeito da tradicional rejeição das interações não-locais por parte dos físicos, a despeito do fato de que todas as forças conhecidas são incontestavelmente locais, a despeito da proibição de conexões com velocidades superiores à da luz, imposta por Einstein, e a despeito de que nenhuma experiência jamais mostrou um único caso de comunicação não mediata mais rápida que a luz, Bell reafirma que o mundo está cheio de inumeráveis influências não-locais. E mais ainda, essas conexões não mediatas não ocorrem somente em circunstâncias raras ou exóticas; elas fundamentam todos os eventos da vida cotidiana. As influências não-locais gozam de ubiquidade porque a própria

realidade é não-local.

Nem todos os físicos creem que a prova de Bell seja uma demonstração infalível da necessária existência de conexões não-locais. Mas as alternativas que esses críticos apresentam parecem-me geralmente obscuras e/ou despropositadas. Conforme veremos no capítulo seguinte, alguns físicos chegarão ao ponto de, efetivamente, "negar a própria realidade", para não aceitar a audaciosa conclusão de Bell de que a realidade quântica deverá ser necessariamente não-local.

COMO BELL PROVOU QUE A REALIDADE NÃO PODE SER LOCAL

Para se entender a significação do teorema de Bell e os argumentos dos seus críticos, torna-se necessário um exame mais detalhado da prova de Bell. Felizmente, o teorema de Bell é mais fácil de demonstrar do que o teorema de Pitá-

goras, ensinado em todas as escolas do segundo grau. A simplicidade da prova de Bell permite que ela seja acessível a qualquer pessoa, e não apenas aos físicos e matemáticos.

A prova de Bell está baseada na mesma experiência EPR utilizada por Einstein, Podolsky e Rosen para demonstrar a existência dos "elementos de realidade" ocultos, que a teoria quântica não descreve. O "paradoxo EPR" se revela no fato de que, durante trinta anos, os físicos não foram capazes de refutar a argumentação de Einstein, Podolsky e Rosen, nem capazes de lançar mais luz sobre os "elementos de realidade" alegados por esses três físicos.

A experiência EPR envolve uma fonte luminosa que produz pares de fótons (Verde e Azul) no "estado geminado". Esses fótons se deslocam em direções opostas para encontrarem detectores de calcita (Verde e Azul) que poderão medir os seus atributos polarização $P(\psi)$ num ângulo ψ. No estado geminado, cada

feixe isolado se mostra completamente não polarizado — uma mistura meio a meio, totalmente aleatória, de altos e baixos em qualquer ângulo que for escolhido.

Embora, separadamente, estejam não polarizados, a polarização de cada fóton está perfeitamente correlacionada à do seu parceiro. Se medirmos a polarização dos dois fótons no mesmo ângulo (um atributo de dois fótons que chamamos de polarização parelha), essas polarizações serão sempre iguais.

Para essa prova, Bell considera um outro atributo de dois fótons denominado correlação de polarização (*CP),* que pode ser medido a partir dos dois fótons. O atributo *CP* é medido do mesmo modo que o atributo *PP,* com a diferença de que as calcitas são ajustadas, não no mesmo ângulo, mas em ângulos diferentes. Para medirmos *CP(&),* ajustamos a calcita Verde num certo ângulo e a calcita Azul no ângulo ψ_A. Em seguida, comparamos as polarizações Ver-

de e Azul para cada par de fótons. Se essas polarizações forem iguais (ambas "alto" ou ambas "baixo"), dizemos que o resultado é "acerto", se forem opostas, dizemos que o resultado é "erro". O ângulo θ *é* o ângulo entre os eixos óticos das duas calcitas, i.e.: $\theta = \phi_V - \phi_A$.

Para fótons no estado geminado, a teoria quântica prevê que $CP(\phi_V - \phi_A)$ depende somente do *ângulo relativo &* entre os eixos óticos das calcitas, e independe dos ajustes individuais ϕ_V e ϕ_A.

Desse modo, se os ângulos das calcitas Verde e Azul diferirem de 30°, a mais ou a menos, o valor de *CP(30)* será sempre o mesmo, independentemente das inclinações individuais dos eixos óticos das calcitas Verde e Azul. O fato de que *CP(9)* depende somente da *diferença* entre as duas calcitas foi amplamente verificado através da experiência.

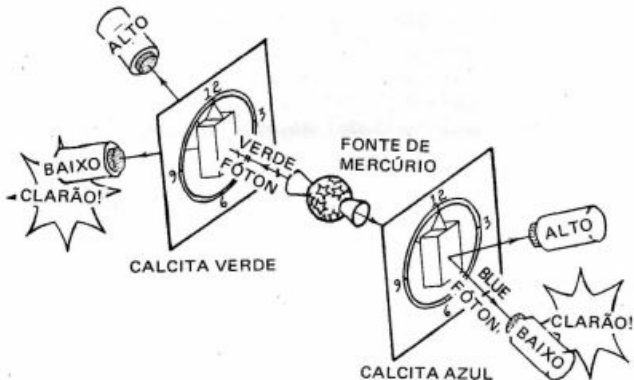



Fig. 12.1. A experiência EPR. A fonte central de mercúrio emite pares de fótons (Verde e Azul) no estado geminado. Nos locais de medição Verde e Azul, a polarização *P(0)* de cada um desses fótons é registrada com o auxílio de um medidor de polarização à base de calcita. O teorema de Bell diz respeito à inusitada intensidade da correlação de polarização existente entre esses fótons Verde e Azul.

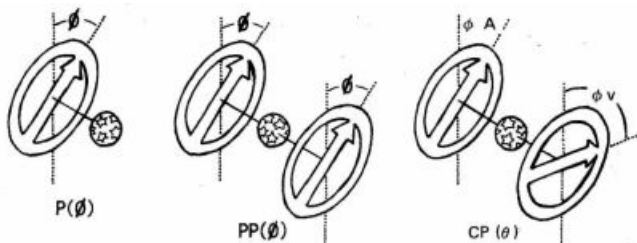



Fig. 12.2. Três tipos de medição de polarização. A. A medição $P(\phi)$ — polarização comum — envolve a contagem do número de fótons polarizados ao longo (alto), ou através (baixo), do eixo ótico da calcita orientada no ângulo ϕ. B. A medição $PP(\phi)$ — polarização parelha — envolve a comparação das polarizações de dois fótons no mesmo ângulo ϕ ("erro" ou "acerto"). C. A medição $CP(\theta)$ — correlação de polarização — envolve a comparação das polarizações de dois fótons em doisânguloa diferentes. (θ é a diferença angular entre as duas ajustagens das calcitas.)

Para cada ângulo θ entre as calcitas, uma medição de *CP* investiga a *fração de "acertos"* obtida numa longa série de pares de fótons. Desse modo, *CP = 1* significa um total de "acertos" (nenhum "erro") enquanto que *CP = 0* significa nenhum "acerto" (um total de "erros"). O teorema de Bell se refere ao modo pelo qual essa fração de "acertos" se altera quando

fazemos variar o ângulo entre as calcitas, desde zero até noventa graus.

Com base em nossa prévia discussão do estado geminado, já sabemos o valor de *CP* a zero grau e a noventa graus: para uma diferença de zero grau entre as calcitas, *CP = 1*. Quando as duas calcitas estão ajustadas no mesmo ângulo, a medida da *CP* é idêntica à daquela que chamamos de *PP,* a qual, para o estado geminado, fornece 100% de "acertos" em todos os ângulos.

Para um ângulo de noventa graus entre os eixos óticos das calcitas, *CP = 0.* Quando uma calcita sofre um giro de noventa graus, a operação de seleção dos fótons simplesmente se inverte: o canal alto passa a ser baixo e vice-versa. A noventa graus, um medidor de polarização atua como se estivesse a zero grau, mas com os resultados invertidos. Essa inversão de canais da calcita, aliada à perfeita correlação existente a zero grau, conduz a uma *anticorre-*

lação perfeita quando os eixos das calcitas estão a noventa graus um com o outro.

A zero grau , *CP = 1* a noventa grau, *CP = 0.* Entre um resultado e outro, *CP* varia entre 1 e 0, à medida em que o ângulo entre as calcitas gira de zero para noventa graus. A essência da prova de Bell é *a forma efetiva dessa variação.*

Para dar ênfase ao que acontece nessa experiência EPR imaginemos que o detector Verde está na Terra e o detector Azul em Betelgeuse (a 540 anos-luz de distância), e que a luz correlacionada no estado geminado vem de uma espaçonave estacionada na metade da distância entre os detectores. Ao passo que, no laboratório, as versões da experiência EPR cobrem apenas a distância entre as paredes de uma sala, as imensas dimensões dessa experiência imaginária nos faz lembrar que, em princípio, as correlações entre fótons independem das distâncias.

A espaçonave atua como uma espécie de farol interestelar, dirigindo um raio de luz Ver-

de para a Terra e um raio de luz Azul para Betelgeuse, na direção oposta. Esqueçamos, por um momento, que os detectores Verde e Azul estão medindo alguma coisa chamada "polarização", e consideremos os seus registros como se fossem mensagens em código transmitidas pela espaçonave. Duas sequências de mensagens binárias sincronizadas compostas de "altos" e "baixos" emergem dos cristais de calcita, separados por uma distância de 500 anos-luz. A prova de Bell diz respeito ao modo pelo qual essas duas mensagens estão conectadas.

Quando as duas calcitas estiverem ajustadas no mesmo ângulo (digamos, 12 h), teremos $CP = 7$. A polarização Verde será exatamente igual a Azul. Duas sequências sincronizadas típicas das medições de polarização distantes poderiam ter o seguinte aspecto, onde D simboliza "baixo" *(down)* e U simboliza "alto" *(up):*

VERDE: UDUDDUDDDUUDUDDU

AZUL: UDUDDUDDDUUDUDDU

Se interpretarmos essas medidas de polarização como sequências de mensagens binárias, sempre que as calcitas estiverem alinhadas, o observador Azul em Betelgeuse receberá a mesma mensagem recebida pelo observador Verde na Terra.

Como a *CP* varia de 1 a 0 quando alteramos o ângulo relativo das calcitas, haverá um ângulo *a* para o qual *CP = 3/4.* Nesse ângulo, para cada *quatro* pares de fótons, o número de "acertos" será (em média) *três,* e o número de "erros" será *um.* Nessa diferença angular das calcitas, uma sequência de medidas de polarização poderá ter o seguinte aspecto:

VERDE: U
D D D D U D D D U D D U D D U
AZUL:
U D U D D D U D D U U D U D D U

No ângulo a, as mensagens recebidas pelos observadores Verde e Azul não são iguais; a mensagem recebida pelo observador Verde difere da mensagem recebida pelo Azul, na proporção de um "erro" para quatro marcas.

Estamos, agora, prontos para demonstrar o teorema de Bell. Fiquemos atentos; essa demonstração é tão curta que passa desapercebida. Alinhemos as calcitas a zero grau (12 h). Verificamos que as mensagens são idênticas. Giremos a calcita Verde de um ângulo *a.* Notamos que as mensagens já não são iguais: elas contêm "erros" — um "erro" para quatro marcas. Giremos a calcita Verde de volta para 12 h: os "erros" desaparecerão; as duas mensagens são iguais novamente. Sempre que o observador Verde gira a sua calcita de um ângulo a numa ou noutra direção, verificamos que as mensagens diferem na proporção de uma marca em quatro. Girando-se a calcita Verde de volta para

12 h, fica restaurada a igualdade das duas mensagens.

O mesmo acontece em Betelgeuse. Quando as duas calcitas estão ajustadas em 12 h, as mensagens são idênticas. Quando o observador Azul gira a sua calcita de um ângulo a numa ou noutra direção, verifica-se que as mensagens diferem na proporção de um para quatro. Girando-se a calcita Azul de volta para 12 h, fica restaurada a igualdade das duas mensagens.

Tudo o que foi descrito até aqui, diz respeito aos resultados de determinadas experiências de correlação que podem ser verificados no laboratório. Faremos agora uma suposição a respeito do que pode estar acontecendo — uma suposição que não pode ser verificada diretamente: a pressuposição de localidade, que constitui o núcleo da prova de Bell.

Admitimos que *o giro da calcita Azul só pode afetar a mensagem Azul-,* do mesmo modo, o giro da calcita Verde só pode afetar a

mensagem Verde. Essa é a famosa pressuposição de localidade de Bell, e é idêntica à pressuposição feita por Einstein no seu paradoxo EPR: as ações do observador Azul não podem afetar os resultados obtidos pelo observador Verde. A pressuposição de localidade — os atos do observador Azul não alteram o código do observador Verde — parece ser perfeitamente razoável: como poderia uma ação em Betelgeuse alterar o que está acontecendo, agora, na Terra? No entanto, conforme veremos, essa pressuposição "razoável" conduz imediatamente a uma previsão que contraria os fatos. Vejamos o que essa pressuposição de localidade nos obriga a inferir, com respeito ao resultado de experiências possíveis.

Com as duas calcitas previamente ajustadas em 12 h, giremos a calcita Azul de um ângulo a e, ao mesmo tempo, giremos a calcita Verde de um mesmo ângulo a, mas na *direção oposta.* As calcitas estarão desalinhadas num ângulo de

2a. Qual será a nova proporção de "erros"?

Considerando que o giro da calcita Azul de um ângulo a insere um "erro" na sequência Azul (para cada quatro marcas), e o giro da calcita Verde de um ângulo a insere um "erro" na sequência Verde, poderíamos ingenuamente supor que, girando as duas calcitas teríamos exatamente dois "erros" para quatro marcas. Contudo, essa suposição não considera a possibilidade de que um "erro Azul" possa cair sobre a mesma marca de um "erro Verde" — uma coincidência que produziria um "acerto" aparente e restauraria a igualdade naquela marca. Levando em consideração essas "superposições corretoras" revisamos nossa estimativa de "erros" e faremos a previsão de que, sempre que as calcitas estiverem desalinhadas de um ângulo igual a 2a, a proporção será de dois erros — *ou menos.*

Essa previsão é um exemplo da *inequação de Bell.* Essa inequação de Bell diz: Se a pro-

porção de "erros” no ângulo a é 1/4, essa proporção, no ângulo 2a não pode ser superior a 2/4.

Essa inequação de Bell deriva da pressuposição de localidade e faz uma previsão definida com respeito ao valor do atributo *CP* num certo ângulo, para um par de fótons no estado geminado. Ela prevê que, quando as calcitas estão desalinhadas por um ângulo 2alfa,(VER PDF) *a* diferença entre as sequências de polarizações Verde e Azul não excederá de dois erros em quatro marcas. Os fatos quânticos, contudo, dizem o contrário. John Clauser e Stuart Freedman efetuaram essa experiência EPR em Berkeley e mostraram que uma diferença angular de 2a nas calcitas dá três erros para quatro marcas — uma considerável violação da inequação de Bell.

A experiência de Clauser contraria de maneira conclusiva a inequação de Bell. Consequentemente, uma das pressuposições adotadas

em sua dedução é necessariamente falsa. Porém, a argumentação de Bell utiliza, principalmente, fatos que podem ser verificados — correlações de fótons em ângulos determinados. A única pressuposição que não é acessível à experiência é a pressuposição de localidade. Considerando que ela conduz a uma previsão que discorda fortemente dos resultados experimentais, essa pressuposição de localidade deve necessariamente estar errada. Para salvaras aparências, precisamos negar a localidade.

Negar a localidade significa aceitar a conclusão de que, quando o observador Azul gira a sua calcita em Betelgeuse, ele altera em parte, instantaneamente, o código do observador Verde, na Terra. Em outras palavras, os locais Azul e Verde, afastados por uma distância de cerca de quinhentos anos-luz, estão de algum modo ligados por uma interação não-local. Essa refutação experimental da pressuposição de localidade é a base efetiva do teorema de Bell: ne-

nhuma realidade local pode fundamentar os resultados da experiência EPR.

Einstein, Podolsky e Rosen utilizaram a pressuposição de localidade para provar a existência de "elementos de realidade" que a teoria quântica deixava de considerar. No entanto, se os observadores Azul e Verde estão ligados por uma interação não-local, como parece indicar a efetiva violação da inequação de Bell, a argumentação EPR fica invalidada em virtude de uma premissa falsa. O fracasso de sua argumentação não prova, evidentemente, que os "elementos de realidade" não existem, mas somente que não se pode defender a sua existência utilizando o raciocínio EPR. A necessidade lógica de interações não-locais resolve o paradoxo EPR (segundo Bell) "da maneira que Einstein menos teria apreciado".

Reexaminando o paradoxo EPR em sua autobiografia, Einstein reafirmou sua crença na localidade: "Há uma suposição que devemos,

em minha opinião, manter de modo absoluto: a situação efetiva real do sistema Verde independe do que é feito no sistema Azul, espacialmente separado do primeiro." Einstein não viveu para ver a prova de Bell, e ficaria certamente surpreso com a refutação do postulado que ele mais queria preservar. Porém, achamos que ele teria recebido de bom grado as estranhas novidades a respeito da verdadeira natureza do mundo quântico, trazidas pelo teorema de Bell. Os resultados obtidos por Bell apoiam a intuição de Einstein de que algo estranho acontece quando duas partículas estão quanticamente correlacionadas.

Como no caso do paradoxo EPR, é importante perceber o que Bell não fez. Ele não descobriu uma situação experimental em que as interações não-locais são observadas diretamente. Ao contrário, ele criou um argumento simples, baseado em resultados experimentais que *demonstra indiretamente* a necessária existên-

cia das conexões não-locais.

Os fenômenos revelados por pares de fótons no estado geminado são inteiramente *locais*. 0 único atributo pertencente ao espaço das quantidades de movimentos angulares intrínsecos (espaço de *spins)* acessível ao observador Verde é a polarização *P(ψ)* do seu fóton Verde. O resultado da medida' desse atributo é sempre aleatoriamente meio a meio (não polarizado), independentemente do modo pelo qual o observador Azul ajusta a sua calcita. Em razão de que, seja qual for o procedimento do observador Azul, o observador Verde não pode detectar qualquer alteração de polarização em seu fóton, o observador Azul não poderá enviar qualquer mensagem — mais rápida que a luz, ou não — de Betelgeuse para a Terra mediante esses fótons correlacionados.

Contudo, se o argumento de Bell estiver correto, a realidade por trás desses fenômenos aparentemente locais, não apenas poderá ser,

mas *precisará ser* não-local: O que exige conexões não-locais não é meramente a correlação dos fótons, mas o fato de que, no estado geminado, os fótons estão correlacionados *de modo extremamente forte.* Pode-se imaginar muitas situações que mostram a perfeita correlação no ângulo $\theta = 0^o$ e a perfeita anticorrelação no ângulo $\theta = 90°$, e cujas correlações intermediárias efetivamente *satisfazem* à inequação de Bell. Alguns exemplos desses sistemas fracamente correlacionados estão mostrados na Fig. 12.5. Correlações fracas podem sempre ser explicadas mediante interações estritamente locais. Por outro lado, os sistemas fortemente correlacionados (como os da Fig. 12.4) contrariam a inequação de Bell; suas partes estão mais sincronizadas do que seria lícito esperar. Nenhum modelo local de realidade pode explicar esse comportamento fortemente entrosado. O teorema de Bell dá àqueles que compartilham a opinião de Newton, de que as influên-

cias não-locais são "um grande absurdo", uma oportunidade de testarem suas convicções. Para os que são leais à localidade, o argumento de Bell, que visa a demonstrar a existência de conexões ocultas, mais rápidas que a luz, deverá estar errado. Aqueles que, de antemão, estão convencidos do erro de Bell, deveríam estar fortemente motivados para descobrir a falha do seu raciocínio. Veremos mais adiante algumas tentativas recentes de invalidar o argumento de Bell e restaurar um mundo estritamente local.

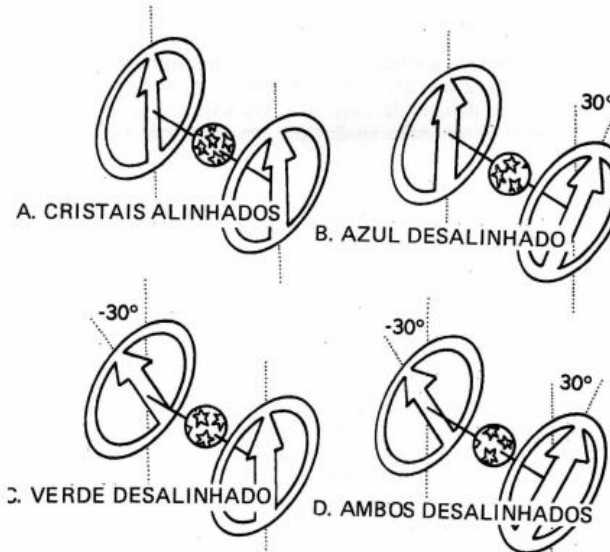



Fig. 12.3. Demonstração simplificada do teorema de Bell. A. Calcitas alinhadas: "erros" = 0. B. Cristal Azul inclinado a 30°: "erros" = 1 em quatro marcas. C. Cristal Verde inclinado a -30°: erros" = 1 em quatro marcas. D. Cristais Verde e Azul inclinados 30°; qual será o novo "erro"?

Se admitirmos a "localidade" (a movimentação da calcita Verde não pode alterar a marca Azul), esse novo erro não poderá ser maior do que 2 em quatro marcas. Porém, para fótons EPR, a medição da CP a 60° dá 3 "erros" em quatro marcas. Conseqüentemente a pressuposição de localidade é falsa.

Por outro lado, se o raciocínio de Bell estiver correto, deverão realmente existir conexões invisíveis não-locais. Seremos capazes de tornar diretamente evidentes essas conexões, ao invés de confiar na argumentação indireta de Bell? A possibilidade de uma efetiva comunicação mais rápida que a luz através da conexão quântica será discutida no capítulo seguinte.

Bell demonstrou o seu teorema para o caso particular de um sistema de dois fótons. Que justificativa existe para que estendamos a sua conclusão (a realidade que fundamenta a experiência EPR precisa ser não-local) ao caso geral da experiência de todos os dias (a realidade que fundamenta *tudo* precisa ser não-local)? Para ampliar o escopo do argumento de Bell, nos voltaremos para a teoria quântica.

No formalismo da teoria quântica, o que responde pela forte correlação dos fótons no estado geminado é o *embaralhamento das fases*. Toda vez que um sistema quântico A encon-

tra um sistema quântico B, suas fases se misturam. Uma parte da onda mandatária de A vai-se embora com a onda de B, e vice-versa. Daí em diante, o embaralhamento das fases estabelece uma conexão instantânea entre dois quons quaisquer que, uma vez, tenham agido
um sobre o outro. Antes da descoberta feita por Bell, essa forte conexão quântica tinha sido reconhecida (especialmente por Schrodinger, que a considerava o aspecto mais característico da teoria quântica), mas era vista pelos físicos como uma espécie de ficção matemática sem raízes na realidade. Como o teorema de Bell exige uma conexão mais rápida que a luz, e a teoria quântica a fornece — sob a forma de conexões de fase ubíquas porém presumidamente "fictícias" — talvez essas conexões quânticas não sejam tão fictícias como se acreditava.

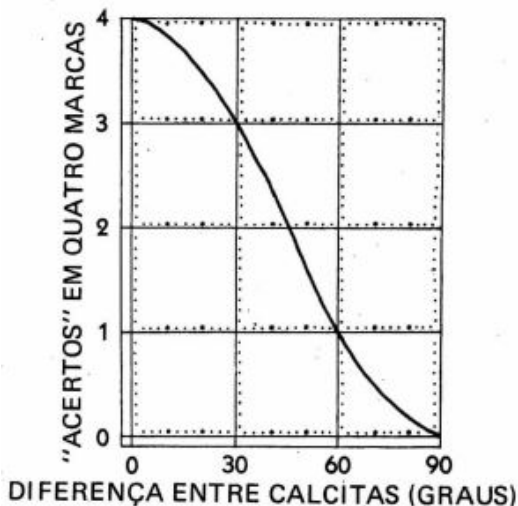



Fig. 12.4. Previsão da teoria quântica para $CP(\theta)$ da luz de mercúrio no estado geminado. Esse resultado contraria a inequação de Bell e, portanto, desmente a pressuposição de localidade. Em 1972, essa previsão passou a ser um fato (medido por Clauser em Berkeley); hoje os fatos quânticos confirmam que a pressuposição de localidade é falsa.

Considerando que não há nada que, em última análise, não seja um sistema quântico, se a conexão quântica de fase é "real” ela une *todos os sistemas que, alguma vez no passado, tenham exercido entre si uma ação recíproca* — não apenas no estado de fótons geminados — de modo a constituírem uma só forma ondulatória, cujas partes mais distantes estão interligadas de maneira não mediata, não atenuável e instantânea. O mecanismo dessa conectibilidade instantânea não é algum campo invisível que se estende de uma parte para a parte seguinte, mas o fato de que um pouco do "ser" de cada parte está alojado na outra. Cada quon deixa um pouco de sua "fase" aos cuidados do outro, e essa permuta de fases torna-os ligados para sempre. Talvez nunca venhamos a saber o que é realmente o embaralhamento de fases, mas o teorema de Bell nos diz que esse embaralhamento não é uma ficção matemática sem substância, e sim uma realidade com a qual se

pode contar.

A EXPERIÊNCIA DE CLAUSER

Em 1964, quando Bell inferiu a sua inequação, não existia nenhuma medição de *CP* que pudesse testá-la. Porém, o *cálculo* da polarização do estado geminado é um problema elementar da teoria quântica. Esse cálculo prevê que $CP(\theta) = cos^2\ \theta$, uma relação representada graficamente na Fig. 12.4. O ângulo *a,* para o qual os "erros" estão na proporção de 1 para 4, será, com base no $\cos^2(\theta)$, de 30°. Consequentemente, a inequação de Bell exige que a quantidade de "erros", para o ângulo *2a* (60°, neste caso), não exceda a proporção 2/4. Contudo, a 60°, aquela expressão dá uma proporção de "erros" igual a 3/4. Sendo 3/4 consideravelmente maior do que 2/4, a expressão teórica $CP = cos^2\ \theta$ contraria a inequação de Bell. Esse resultado

caracteriza o estado geminado como um sistema *fortemente* correlacionado — um par de entidades com uma ligação mais intensa do que a que poderia ser explicada por qualquer realidade local.

O fato de que esse resultado calculado contraria a inequação de Bell significa que *nenhum sistema que confirme essas previsões quânticas pode ser explicado por uma realidade local.* Antes da descoberta feita por Bell, podia-se imaginar que uma realidade local estava oculta sob os fatos experimentais; após 1964, só se pode despreocupadamente acreditar num mundo estritamente local, na esperança de que *a teoria quântica esteja errada* em suas previsões concernentes aos fótons no estado geminado.

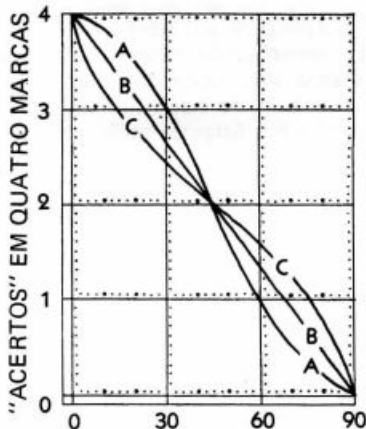



Fig. 12.5. Correlações de polarização que não contrariam a inequação de Bell. A curva A é a luz de mercúrio fortemente correlacionada, representada na Fig. 12.4. A linha reta B satisfaz à inequação de Bell; o mesmo acontece com a curva C. As curvas B e C podem ser simuladas por mecanismos locais; elas apresentam correlação fraca. A curva A não pode ser simulada por nenhum mecanismo local. Essas curvas mostram quanto é pequena a diferença quantitativa em que repousa o importante teorema de Bell.

Considerando-se que a prova de Bell desafia uma das mais acalentadas crenças dos físicos — a de que o mundo é fundamentalmente local — poder-se-ia esperar que ela explodisse como uma bomba nos corredores da ciência. Ao invés disso, a prova de Bell, divulgada numa pequena e pouco conhecida publicação científi**ca**, foi amplamente ignorada até pelos físicos que conseguiram tomar conhecimento dela.

Muitos físicos não se impressionam com a prova de Bell porque ela trata da *realidade,* e não dos fenômenos. A maioria dos físicos é constituída de fenomenalistas, cujo mundo profissional está circunscrito pelos fenômenos e pela matemática. O fenomenalista imagina uma ciência que avança em duas direções: 1. novas experiências revelam novos fenômenos; 2. novas matemáticas explicam ou preveem os fenômenos de maneira original. Como a prova de Bell não propõe novas experiências e não

cria novas matemáticas de importância para os fenômenos, ela não se inclui nas elegantes fórmulas de sucesso na ciência e é geralmente descartada pelos cientistas como "mera filosofia".

A fria recepção que os físicos deram à prova de Bell faz lembrar a famosa orientação de David Hume para se fazer a distinção entre a verdade e a insensatez: "Ela contém raciocínio abstrato concernente a quantidade ou números? *Não.* Ela contém algum raciocínio experimental relacionado aos fatos e à existência? *Não.* Que seja então atirada às chamas, pois só pode conter sofismas e ilusão."

Em meio a esse clima de indiferença para com as teorias da realidade, John Clauser, um jovem Ph.D. da Universidade de Colômbia, propôs-se a medir, efetivamente, os fótons no estado geminado, a fim de verificar se o seu atributo de correlação de polarização satisfazia à inequação de Bell (o mundo é local; a teoria quântica está errada) ou não (o mundo é não-

local, a teoria quântica está correta). Clauser não obteve apoio, na Universidade de Colúmbia, para a sua proposta de testar experimentalmente a inequação de Bell, e mudou-se para a Universidade de Berkeley, onde já havia a aparelhagem que ele poderia adaptar à medição de fótons no estado geminado.

Vários tipos de átomos excitados emitem pares de fótons no estado geminado, quando retornam ao estado de terra. A maioria das experiências efetuadas para testarem a inequação de Bell tem utilizado os átomos de mercúrio excitados pelo impacto de elétrons, ou átomos de cálcio excitados pelo raio laser. A fonte de mercúrio de Clauser, em Berkeley, funciona como uma lâmpada de rua, de vapor de mercúrio — ambas emitem luz geminada Verde e Azul — mas a fonte de Clauser era menor e mais intensa do que as lâmpadas que inundam de fótons geminados as nossas avenidas, todas as noites.

Considerando que os detectores de fótons

existentes não são 100% eficientes — eles registram somente cerca de 10% dos fótons que se chocam de encontro à placa frontal de fósforo — não se pode, simplesmente, comparar a inequação de Bell aos resultados experimentais. Fazendo uma adaptação do raciocínio original de Bell às realidades experimentais existentes, Clauser e seus colegas deduziram uma versão da inequação de Bell (denominada "inequação CHSH", tirada das iniciais de John F. Clauser, Michael A. Home, Abner Shimony e Richard A. Holt) que pode ser testada em detectores de baixa eficiência.

Clauser resolveu testar a inequação de Bell motivado pela sua forte crença de que o mundo é, em última análise, local. Se a teoria quântica prevê um resultado conflitante (através da prova de Bell) com a localidade, tanto pior para a teoria quântica. Clauser esperava que sua experiência mostrasse o erro da teoria quântica, pelo menos no que se refere à polarização no estado

geminado. Os resultados provaram justamente o inverso. Em 1972, Clauser anunciou que a teoria quântica tinha sido aprovada no seu teste. A inequação de Bell tinha sido contrariada experimentalmente pelos fótons Azul e Verde, em Berkeley. Agora, não somente a teoria quântica, mas os fatos quânticos também contradizem a hipótese de que o mundo está unido por linhas estritamente locais.

A EXPERIÊNCIA DE ASPECT

O teste pioneiro da inequação de Bell, efetuado por Clauser, contém uma brecha, através da qual um lógico, em desespero, poderia, ainda, inferir um mundo local. Para apontar com precisão essa brecha, voltemos à nossa imaginária experiência EPR no espaço.

A fonte de mercúrio de Clauser enviava luz Azul e Verde para os cantos opostos de uma sala. O farol de nossa espaçonave dispara fótons

para Betelgeuse e para a Terra, separadas por uma distância de quinhentos anos-luz.

Clauser comutava a orientação dos seus medidores de polarização a cada 100 segundos. Esse ritmo, traduzido na escala cósmica do farol, corresponde a manter fixos os medidores de polarização na Terra e em Betelgeuse, *por mais de um bilhão de anos*. Essas tão descansadas medições de polarização permitiriam o vazamento de informação, entre a Terra e Betelgeuse, sobre os ajustes dos medidores de polarização, com velocidades inferiores à da luz (levadas talvez pela tagarelice dos turistas interestelares). Essas informações permitiriam aos fótons simular a existência de correlações fortes, utilizando meios estritamente locais. Para eliminar a possibilidade de vazamentos de informação, a velocidades inferiores à da luz, durante os longos períodos de descanso dos medidores de polarização, o experimentador precisa estar capacitado para alterar os medidores en-

quanto o fóton está em trânsito. Alterar a calcita com essa rapidez,, corresponde, no laboratório, a inverter a sua orientação em alguns bilionésimos de segundo.

Infelizmente, a matéria comum não pode, simplesmente, se mover tão rapidamente. Porém, o físico Alain Aspect, da Universidade de Paris, criou uma experiência para testar a inequação de Bell que utiliza dois comutadores acústico-óticos para desviar cada feixe de fótons na direção de um ou outro detector de calcita pré-ajustado. Ao invés de mover rapidamente as calcitas, Aspect move os raios de luz.

Com os seus comutadores ultrarrápidos, Aspect pode medir uma polarização diferente a cada 10 bilionésimos de segundo — suficientemente rápido para prevenir vazamentos de informação a velocidades inferiores à da luz entre os medidores Azul e Verde. Se os fótons geminados de Aspect contrariarem a inequação de Bell, isso significa que a realidade que

fundamenta a sua forte correlação precisa pôr em contato as estações de medição Azul e Verde a uma velocidade maior do que a da luz. Aspect completou a sua experiência em 1982, comprovando a forte correlação prevista pela teoria quântica, contrariando, consequentemente, a inequação de Bell, e corroborando o seu ponto de vista de que o nosso mundo fenomenalmente local está, na verdade, sustentado por uma realidade invisível não mediata, não atenuável e mais rápida que a luz.

Embora o teorema de Bell tenha surgido no contexto da teoria quântica, os seus resultados não dependem da veracidade dessa teoria. As experiências de Clauser e Aspect mostram que a inequação de Bell é contrariada pelos fatos. Isso significa que, mesmo que a teoria quântica venha a falhar algum dia, sua sucessora deverá, igualmente, contrariar a inequação de Bell, quando explicar o estado geminado. As teorias da física não são eternas. Quando a teoria quân-

tica se juntar ao flogisto, ao calórico e ao éter luminífero no pátio de refugos da física, o teorema de Bell continuará válido. Por estar baseado nos fatos, o teorema de Bell chegou para ficar.

MUNDOS IMPOSSÍVEIS

O teorema de Bell é um instrumento importante para a pesquisa da realidade porque permite, àqueles que criam mundos imaginários, rejeitar confiantemente, à primeira vista, milhões de mundos impossíveis. O teorema de Bell afirma diretamente: "Se é local, é bobagem."

Um dos mundos eliminados definitivamente pela prova de Bell é o "modelo de perturbação" da realidade quântica. Nesse modelo — uma forma de neorrealismo — as entidades quânticas realmente possuem atributos próprios, estejam ou não medidas, mas o instrumento de medida altera esses atributos de maneira im-

previsível e incontrolável. A inevitável perturbação do sistema quântico pelo instrumento que o mede dá origem, nesse modelo de realidade, ao caráter aleatório quântico, ao princípio da incerteza, e a todas as outras excentricidades quânticas.

Numa figuração de como o mundo quântico poderia realmente funcionar, muitos físicos (que não dedicaram muita atenção ao assunto) se refugiam em algum vago modelo de perturbação para a realidade. Durante vários anos, deixei de pensar na questão da realidade quântica, supondo que alguma espécie de modelo de perturbação seria suficiente para dar conta dos estranhos fatos quânticos.

Um modelo de perturbação explicaria, por exemplo, a polarização observada no fóton Verde da experiência EPR, como consequência da "incontrolável perturbação" provocada pela calcita Verde em algum atributo intrínseco do fóton Verde. Em outras palavras, esse modelo

explica os resultados obtidos pelo observador Verde, recorrendo a um hipotético mecanismo que envolve apenas o fóton e a calcita Verde. O teorema de Bell mostra que um mecanismo local como esse, por mais engenhoso que fosse, simplesmente não se ajustaria aos fatos quânticos. A prova de Bell descarta o modelo de perturbação porque ele é local.

As publicações fáceis, de caráter popular, frequentemente recorrem aos modelos de perturbação da medição para justificarem o princípio da incerteza de Heisenberg: não podemos conhecer uma entidade quântica como ela é porque inevitavelmente perturbamos tudo aquilo que observamos. Os resultados obtidos por Bell mostram que essa noção de que a medição quântica constitui uma perturbação local é tão antiquada quanto a imagem obsoleta do átomo como miniatura do sistema solar.

Outro tipo de mundo impossível é o "estilo clássico" de realidade simbolizado pela maçã

de Newton. Maçãs e tudo mais nesse tipo de mundo são verdadeiramente objetos comuns que possuem atributos só seus, mesmo quando não estão sendo medidos. Quando medida, seja por homens, mulheres ou máquinas, uma maçã clássica simplesmente revela alguns atributos que possuía previamente.

Esse mundo da maçã (que os técnicos chamam de "realidade contextual não-local") não é inconcebível ou ilógico. Porém, de acordo com o teorema de Bell, o mundo da maçã é impossível porque não pode ajustar-se aos fatos. Como modelo do mundo em que realmente vivemos, o mundo da maçã, e todos os seus contraparentes locais não contextuais, são puramente mundos de fantasia, em virtude do seu caráter local.

Precisamos, obviamente, ser mais exigentes em nossa escolha de mundos possíveis. Imaginemos, por exemplo, uma *realidade relacional* moldada segundo as noções de Niels Bohr. As entidades que constituem um mundo

como esse são semelhantes ao arco- íris: não possuem atributos definidos a não ser sob condições de medição definidas. Na medição, os atributos vêm à tona, mas constituem uma propriedade conjunta da entidade e do instrumento *M*. Em uma realidade de arco-íris (denominada "contextual local"), os atributos não são inerentes à entidade, e se alteram com as condições de observação. A única restrição que fazemos a essas alterações induzidas pela observação é a de que os instrumentos *M* distantes não poderão alterar uma condição da entidade, quando essa influência exigir um sinal mais rápido que a luz. Numa realidade contextual, mas local, somente os observadores próximos tomam parte na determinação dos supostos atributos de uma entidade.

Como o mundo da maçã, também o mundo do arco-íris não é inconcebível nem ilógico. Simplesmente, em virtude de seu caráter local, ele não é a espécie de mundo em que nos é da-

do viver.

O teorema de Bell rejeita os mundos da maçã; ele rejeita também os mundos do arco-íris. Que tipos de mundo o teorema de Bell admite?Imaginemos alguém chamado Joe Verde, habitando um mundo contextual *não-local.* Lá em cima, no seu céu, Joe vê um arco-íris constituído de pontos coloridos, formando um desenho cintilante. Ao contrário dos pontos regularmente distribuídos de uma foto- gravura, os pontos do arco-íris de Joe formam um arranjo irregular.

No lado oposto em relação ao mesmo sol, está uma contra- Terra onde Suzie Azul observa um outro arco-íris em seu contra- céu. O arco-íris de Suzie consiste, também, de um arranjo aleatório de pontos coloridos. Quando Joe Verde movimenta a sua cadeira, o seu arco-íris também se move (o atributo posição de um arco-íris é contextual, e não inato), mas o arco-íris de Suzie fica imóvel. Contudo, quando Joe

move a cadeira, o arranjo aleatório de Suzie, a uma distância de 200 milhões de milhas, assume instantaneamente um arranjo diferente (ainda aleatório) de pontos coloridos. Suzie não percebe essa alteração — um arranjo aleatório se parece muito com outro arranjo aleatório qualquer — mas essa alteração realmente ocorre, quer ela perceba ou não.

O *fenômeno* nesse mundo hipotético, quer o arco-íris se mova ou não, é completamente local: o arco-íris de Suzie não se move quando Joe muda de lugar. No entanto, a *realidade* desse mundo — o arranjo dos pontos que constituem os dois arco-íris — é não-local: os pontos de Suzie se alteram instantaneamente sempre que Joe movimenta a sua cadeira.

Um mundo contextual não-local como esse, onde arco-íris estáveis são tecidos sobre uma trama mais rápida que a luz, constitui um exemplo do tipo de mundo permitido pelo teorema de Bell. Um universo que apresenta *fenô-*

menos locais erigidos sobre uma *realidade não-local* é a única espécie de mundo compatível com os fatos conhecidos e com a prova de Bell. O mundo do arco- íris mais rápido que a luz poderia ser o tipo de mundo em que vivemos.

Durante os últimos vinte anos, o teorema de Bell tem sido demonstrado de muitas maneiras, dentre as quais algumas recorrem aos atributos do fóton e outras não. Minha versão da prova de Bell não utiliza, essencial mente, o conceito do fóton ou dos seus atributos. Embora os fótons Verde e Azul, bem como os seus atributos de polarização, sejam mencionados para familiarizar o leitor com os detalhes da experiência EPR, quando se trata de demonstrar o teorema de Bell, meu argumento é formulado inteiramente em termos de um par de mensagens binárias impressas por objetos macroscópicos definidos. Demonstro aqui o teorema de Bell em termos de movimentos (orientações dos cristais

de calcita) e marcas ("altos" e "baixos" impressos numa fita de registro de dados).

O teorema de Bell, como relação entre movimentações e marcas, remove a não-local idade do micromundo inacessível e a coloca honestamente no mundo familiar dos gatos e das banheiras. Expresso em uma linguagem inteiramente macroscópica, o teorema de Bell diz: *Na realidade, a movimentação Verde necessariamente altera, de maneira não-local, a marca Azul.* Partindo de argumentos baseados somente nos fenômenos (sem qualquer recurso a atributos ocultos), concluímos que os "cliques" em um determinado contador estão necessariamente conectados, de maneira instantânea, à movimentação de um cristal de calcita distante.

Para qualquer pessoa interessada na realidade, o teorema de Bell é uma notável realização intelectual. Começando com os fatos e um pouco de aritmética, Bell vai além desses fatos para descrever os contornos da própria rea-

lidade. Embora ninguém tenha jamais visto ou suspeitado a existência de um único fenômeno não-local, Bell mostra, de maneira conclusiva, que o mundo por trás dos fenômenos deve necessariamente ser não-local.

Se todos os fenômenos do mundo são estritamente locais, por que a necessidade de apoiar os fenômenos locais sobre uma textura não-local? Confrontamos aqui um senso alienígena de planejamento que se revela exótico perante os padrões humanos: o mundo parece ter sido estranhamente superconstruído. Além disso, as escoras desse mundo, mais rápidas do que a luz, estão quase completamente ocultas — a "não-localidade" teria sido descoberta há muito tempo se fosse mais evidente; ela deixa sua marca apenas indiretamente, através das impossíveis correlações fortes de certos sistemas quânticos obscuros.

Em seu célebre teorema, Bell não apenas sugere ou indica que a realidade é não-local;

ele realmente prova isso, recorrendo à clareza e ao poder de raciocínio matemático. Essa feição compulsória da prova de Bell incomoda particularmente os físicos cuja preferência em relação às realidades é estritamente local.

A importante prova de Bell provocou um furor na pesquisa da realidade, comparável ao escândalo causado por Einstein- Podolsky-Rosen, em 1935. Por um lado, o teorema de Bell confirma a existência de uma invisível realidade não-local. Aqueles que preferem que suas realidades sejam locais não foram capazes, até agora, de refutar a argumentação de Bell. O fato de que a prova de Bell é notavelmente clara e breve não apressou a sua refutação.

John Stewart Bell

Fig. 12.6. John Stewart Bell, físico do Centre Européen pour Recherches Nucléaires – CERN, criador do teorema da interconectibilidade, que estabelece a não-localidade como uma característica geral deste mundo.

Pelo outro lado, embora o teorema de Bell *indiretamente* necessite uma não-localidade profunda, ninguém produziu uma maneira de mostrar *diretamente* essa pretensa não-localidade, sob a forma, por exemplo, de um sistema

de comunicações mais rápidas do que a luz, baseado nessas profundas conexões quânticas. Se a última linha da pesquisa da realidade é "A realidade tem consequências”, então essa realidade profunda avalizada por Bell não conseguiu até agora causar um grande impacto. Ninguém pode adivinhar o que o futuro reserva para essa realidade profunda, instantaneamente conectada, mas ainda inacessível, criada por Bell.

13. O Futuro da Realidade Quântica

Golpeia na fonte a diária confusão
Elimina da fantasia a obscuridade
Limpando dos teus sentidos a ilusão
Desfruta o gosto da Realidade;
Limpando dos teus sentidos a ilusão
Desfruta o gosto da Realidade.
"Calipso da Realidade" de BENJAMIN BUNNY FACES REALITY

A prova de Bell tem a forma lógica da reductio ad absurdum:

1 Faça uma hipótese A;
2. Mostre que ela conduz a uma contradição; donde
3. Conclua que a hipótese A é falsa.

Para demonstrar o seu teorema, Bell admite uma realidade local, mostra (com um pouco de aritmética) que isso contradiz os fatos experimentais, e então conclui que nenhuma realidade local pode fundamentar esses fatos. Donde, a realidade é não-local.

As demonstrações por *reductio ad absurdum* são especialmente vulneráveis à refutação porque é impossível fazer apenas uma pressuposição. Ao lado da pressuposição principal A, surgem furtivamente inevitáveis numerosas pressuposições secundárias a, b, c, d. Se estivermos particularmente interessados na pressuposição A, podemos fazer descarrilar a prova de que ela é absurda, jogando a culpa da contradição lógica, por exemplo, na pressuposição b.

No caso da prova de Bell, pode-se preservar a crença numa realidade local negando uma das outras pressuposições feitas por ele. Contu-

do, sendo a prova de Bell tão curta e sendo a maior parte das suas pressuposições passível de experimentação, não é fácil encontrar essas suposições adicionais. Por isso, as várias refutações da conclusão de Bell tendem a ser um tanto forçadas e conduzem a realidades mais absurdas do que a realidade mais rápida que a luz, que elas tentam exorcizar.

TENTATIVAS DE REFUTAÇÃO DA PROVA DE BELL

Consideremos, por exemplo, o curioso argumento de N. D. Mermin, físico da Universidade Cornell, de que, desde que Bell admite uma realidade local, pode-se pôr a culpa da contradição, tanto na pressuposição de localidade, quanto na pressuposição de "realidade". Mermin quer conservar a localidade e, no que lhe concerne, a realidade deve ser descartada. Mermin utiliza o mesmo método de Bell, de *re-*

ductio ad absurdum, para concluir que "pode-se provar que a lua não está lá quando ninguém está olhando."

É difícil transmitir para os de fora o desagrado que os físicos, em sua maioria, sentem quando ouvem a expressão "não-localidade". A física, afinal, está cheia de noções extravagantes. O que há de tão repulsivo numa conexão mais rápida que a luz? O argumento de Mermin ilustra, melhor do que pode ser dito com palavras, a profunda antipatia que a maioria dos físicos nutre pela ação a distância, não-mediata; essas pessoas sentem uma tal adoração pela localidade que, de bom grado, negariam a própria realidade antes de admitirem um mundo que seja não-local.

Contudo, quando ouvirmos um físico dizer que "nega a realidade", devemos desconfiar dessa afirmação. Não imaginemos que o pobre coitado acha que tudo é um sonho. Ele quer apenas dizer que a realidade que tem em mente

está um tanto fora dos padrões convencionais. Os físicos que negam inteiramente a realidade deixam de ser físicos, e suas idéias não aparecem nas publicações científicas.

A forma da conclusão de Memin mostra que ele acredita numa realidade do tipo "criada pelo observador" — a variedade que chamamos de "realidade do arco-íris", por causa da dependência do atributo posição do arco-íris em relação ao observador. A realidade do arco-íris pode ser servida em dois sabores: realidade local do arco-íris (o observador Verde cria somente o código Verde) e realidade não-local do arco-íris (o observador Verde colabora, também, na criação do código Azul). É fácil mostrar (através do argumento de Bell) que uma realidade local criada pelo observador contraria os fatos quânticos tão certamente quanto a realidade local (sem outras especificações) original de Bell.

A tentativa desesperada de Memin para es-

capar ao demônio da não-localidade, aceitando uma realidade que é criada pelo observador, simplesmente não funciona. O tipo brando de realismo, da criação pelo observador, sancionado pela teoria quântica — a saber, os atributos dinâmicos são relacionais — precisa ser não- local para se ajustar aos fatos. Optemos por uma realidade do arco- íris, se assim quisermos, mas ela terá que ser mais rápida que a luz.

Muitos cientistas leem a publicação semanal Science para saberem o que está acontecendo fora de suas áreas. Numa reportagem sobre a experiência de Aspect, o redator Arthur Robinson, da Science, fala em nome de muitos físicos quando observa que a pressuposição A de Bell consiste, na verdade, de duas pressuposições: localidade e, realismo. "Realismo", segundo Robinson, "exige que [os atributos de polarização] existam e tenham valores definidos, quer sejam, ou não, medidos." Ao invés

de abrir mão da localidade, diz Robinson, por que não abandonar, simplesmente, o realismo? Porém, os leitores que me acompanharam até aqui, poderão ver que o realismo de Robinson corresponde ao que chamo de "mundo da maçã": um universo em que as entidades possuem os seus atributos segundo a familiar maneira clássica, independentemente da observação. Até mesmo a cor do bife não é "real", de acordo com os padrões de Robinson.

O banimento da não-localidade avalizada por Bell, desistindo do "mundo da maçã", seria, na verdade, uma vitória pobre. Muitos físicos renunciariam alegremente à realidade clássica se, com isso, restaurassem a localidade, especialmente quando se lembrassem de que von Neumann, em 1932, já tinha provado a incompatibilidade desse tipo de realidade com a teoria quântica. Infelizmente, pode- se abrir mão de mais do que a realidade da maçã e, ainda assim, ficar preso à não-localidade.

Por exemplo, pode-se negar a existência dos fótons e todos os seus atributos, tanto estáticos quanto dinâmicos (nenhum físico foi tão longe), mas, o que restar do mundo (os instrumentos de medida macroscópicos e as suas respostas) ainda precisará estar ligado por conexões mais rápidas que a luz. Examinemos a versão do teorema de Bell apresentada no capítulo anterior: ela nada assume com respeito aos atributos hipotéticos dos fótons, e lida somente com resultados de medidas (marcas) e instrumentos de medida em configurações especificadas (mudanças). Considerando- se que, quando se nega a realidade, retém-se uma crença na real existência dos instrumentos de medida, suas ajustagens e seus resultados, a prova de Bell mostra que as operações dessas máquinas precisam estar conectadas não-local mente. A conexão quântica de Bell une, também, as operações de pesados aparelhos feitos de aço, vidro e calcita, e não apenas conjuga os atri-

butos de micro- entidades invisíveis. Na experiência EPR, a não-localidade profunda de Bell emerge no mundo macroscópico, manifestando-se sob a forma de conexões superfortes entre instrumentos de detecção distantes.

Na minha opinião, podemos escapar da conclusão de Bell (a realidade é não-local) negando a realidade, somente se formos até o fim da linha e afirmarmos que os objetos macroscópicos (inclusive os instrumentos de medida), de algum modo, não estão realmente lá. O bispo Berkeley não acreditava na existência de montanhas, maçãs ou medidores de polarização, porém poucos físicos — mesmo aqueles empenhados na localidade a qualquer preço — querem ir tão longe. Negar a evidência dos sentidos parece ser um preço alto demais para vencer uma discussão. Talvez o mundo realmente seja não-local.

Existem, porém, objeções mais sutis contra

a prova de Bell. Para se ter uma ideia daquilo que é chamado de "pressuposição DCF", voltemos à experiência EPR, na versão do farol da espaço- nave lançando fótons Verdes para a Terra, e Azuis para Betelgeuse. Consideremos a pressuposição de localidade sob a forma: os movimentos do observador Verde não alteram as marcas do observador Azul.

Essa forma da pressuposição de localidade significa que, se a calcita Verde for ajustada em 0° ou em 50°, isso não produzirá qualquer efeito nos resultados Azuis. Porém, para cada par de fótons em particular, o observador Verde pode ajustar a sua calcita em somente um ângulo. Devido a esse fato experimental da vida, a pressuposição de localidade se divide, de fato, em duas partes: 1. Se o observador Verde tivesse ajustado a sua calcita em algum outro ângulo que não o que ele de fato escolhera, resultados definidos (porém desconhecidos) teriam ocorrido tanto para Verde como para Azul; 2. Os re-

sultados no local Azul, para essa ajustagem hipotética, teriam sido iguais aos que Azul teria obtido com a ajustagem de fato escolhida para Verde.

A primeira parte da pressuposição de localidade sugere que, se o observador Verde tivesse resolvido efetuar alguma outra medição de polarização, o observador Azul teria obtido algum resultado. Essa suposição (conhecida, entre os aficionados da realidade quântica, como definibilidade contrafactual — DCF) não é testável porque, para cada par de fótons, o observador Verde pode fazer somente um tipo de medição de polarização. Einstein, Podolsky e Rosen tiveram, também, que admitir a DCF em sua famosa prova da existência de "elementos de realidade" não descritos pela teoria quântica. Em nossa analogia das pizzas, a pressuposição da DCF significa que tomamos como certa a noção de que a encomenda de outro tipo de pizza que não aquela que de fato encomenda-

mos resultaria na entrega desse outro tipo. Essa pressuposição da DCF, de que ações hipotéticas conduziriam a resultados definidos, parece razoável, mas não pode, por sua própria natureza, ser testada, visto que cada evento ocorre somente uma vez. Podemos encomendar apenas uma pizza neste sábado à noite; o observador Verde pode alinhar o seu medidor de polarização em apenas uma direção, para o fóton # 1136.

A segunda parte da pressuposição de localidade inclui a noção de localidade per se: ela afirma que as ações hipotéticas do observador Verde não afetam os resultados hipotéticos do observador Azul. Uma vez que a localidade é expressa em termos de resultados hipotéticos — os resultados de escolhas que tivéssemos podido fazer, mas que não fizemos — verificamos que se não admitirmos a DCF, não poderemos sequer formular a noção de realidade, no sentido atribuído por Bell. Os admiradores in-

transigentes de um universo local se aferram a essa brecha lógica e tentam refutar a conclusão de Bell negando a DCF.

Um dos mais proeminente físicos que tentam salvar a localidade atirando fora a DCF é John Wheeler. Ele nega a DCF da seguinte maneira: "[o teorema de Bell] lida com mundos que não existem e nunca poderão existir. O que nos preocupa, aqui, é o mundo real." Wheeler tenta invalidar o teorema de Bell atendo-se à realidade num sentido fortemente estrito, mas sem negá-la.

O raciocínio contrafactual é a base dos planejamentos pessoais, comerciais e militares. O resultado dos jogos de xadrez e de conflitos mais sérios é controlado, não tanto por eventos reais, quanto por ameaças hipotéticas e possibilidades que nunca ocorrem, mas que poderiam ocorrer, caso tivéssemos agido de modo diferente. O raciocínio em termos de resultados hipotéticos assume forma concreta em planos de

emergência para ataques nucleares e nas árvores de decisões do jogo de xadrez computadorizado que, simplesmente, tomam como certa a pressuposição DCF. É para mim difícil entender por que a DCF é justificada no caso de resultados de opções nucleares concebíveis (mas talvez "impensáveis"), e não no caso de resultados fornecidos por medidores de polarização igualmente macroscópicos.

O raciocínio contrafactual está tão profundamente enraizado no pensamento humano que é difícil, mesmo para os obstinados adversários da DCF, eliminá-lo dos seus argumentos. Por exemplo, para que a famosa experiência da escolha retardada, de John Wheeler (discutida no Capítulo 9), tivesse sentido, ele precisou comparar o resultado da experiência A, não com o resultado da experiência B, mas com o resultado que teria ocorrido, caso a experiência B tivesse sido efetuada em vez da experiência A, num claro exemplo de raciocínio contaminado

pela DCF.

Outro modo de aferir a plausibilidade de se objetar ao teorema de Bell através da negação da DCF é indagar: "Em que espécies de mundos concebíveis a pressuposição DCF seria patentemente inválida?" Esse tipo de mundo que não admite a DCF é estritamente determinista, no estilo newtoniano do mecanismo de relógio. Devido à não existência de escolhas reais, o teorema de Bell não pode sequer ser formulado em um universo estritamente newtoniano.

Um modo de fugir às consequências não-locais do teorema de Bell seria imaginar um modelo local de mundo quântico, no qual a DCF fosse uma pressuposição patentemente inválida. Ninguém, que eu saiba, foi suficientemente inteligente para produzir uma imagem de um mundo local que não admita a DCF, compatível com a teoria quântica.

Outras tentativas de invalidação do teorema de Bell implicam em desafiar a lógica ocidental

(i.e., booliana), negando ao observador Verde o livre-arbítrio para executar sutis variações sobre o tema da não-DCF. Os argumentos contrários ao teorema de Bell (e os seus contra-argumentos) tornaram-se tão obscuros que um encontro de físicos para tratar desse assunto faz lembrar um congresso de teólogos medievais.

Os físicos continuam debatendo a invulnerabilidade do teorema de Bell; mas a questão não é realmente saber se Bell pode provar, sem sombra de dúvida, que a realidade é não-local, e sim saber se o mundo é de fato não-local.

AS CONEXÕES NÃO-LOCAIS PERMITEM SINALIZAÇÕES MAIS RÁPIDAS QUE A LUZ?

Se a realidade profunda é, ou não, verdadeiramente não-local, é uma questão que poderia ser resolvida num instante, mediante a descoberta de um único sinal mais rápido que a luz. Se o

mundo está realmente unido por conexões mais rápidas que a luz, não poderíamos explorar essas ligações enviando mensagens super-rápidas para os nossos amigos? Uma realização como essa não só validaria diretamente a conclusão de Bell como iniciaria uma nova era da humanidade, tornando-nos senhores do espaço e do tempo.

Se pudéssemos explorar a conexão quântica, um Super-homem voando mais rapidamente do que a luz, consequentemente voltando no tempo para salvar Lois Lane, não aconteceria apenas nos filmes de cinema. Segundo a relatividade de Einstein, os sinais mais rápidos que a luz abririam canais ligando o presente ao passado — canais que permitiriam às pessoas mudarem hoje o que, por uma contagem convencional, já teria acontecido. O fato de que as sinalizações mais rápidas que a luz envolvem a reversão de causalidade constitui, para os físicos, um poderoso argumento contra a possibi-

lidade da existência dessas sinalizações (e contra a não- localidade em geral); porém, a consecução de um transmissor mais rápido que a luz obviamente invalidaria essas objeções filosóficas.

No farol de fótons EPR, o processo natural que impede a sinalização mais rápida que a luz é o caráter aleatório quântico. Coloquemo-nos ao lado do observador Azul em Betelgeuse. Seja qual for o ajuste que dê ao seu cristal Azul, ele receberá um padrão aleatório meio a meio de "altos" e "baixos". Quando o observador Verde, na Terra, movimenta a sua calcita, sabemos (através do teorema de Bell) que essa ação deverá necessariamente alterar a sequência de marcas do observador Azul. Alguns dos seus "altos" mudam para "baixos" e vice-versa; se isso não acontecesse, a correlação seria mais fraca do que aquela que foi, de fato, observada. Porém, essas alterações das marcas do observador Azul implicam em uma passagem de um

padrão aleatório para outro padrão igualmente aleatório. Como todas as sequências aleatórias se parecem (existem muitos tipos de ordenação, mas um só estado aleatório), o observador Azul não perceberá essa alteração provocada pelo observador Verde. A situação parece ser a de que o observador Verde pode emitir mensagens mais rápidas que a luz, mas o observador Azui não pode decifrá-las.

Mesmo que acreditemos (com base no teorema de Bell) em ligações universais mais rápidas que a luz, precisamos encarar a possibilidade de que essas ligações constituem Unhas privadas acessíveis somente ao uso da natureza, interditadas ao uso humano por um indecifrável embaralhamento decorrente do perfeito estado aleatório quântico.

A PROVA DE EBERHARD CONTRA A SINALIZAÇÃO MAIS RÁPIDA QUE A LUZ

À confusão de provas discutidas até agora — prova de von Neumann (contra uma explicação da teoria quântica baseada na realidade comum), prova EPR (a favor dos "elementos de realidade" ignorados pela teoria quântica) e prova de Bell (contra uma realidade profunda local) — sou obrigado a acrescentar mais uma. Se a teoria quântica está correta, pode-se provar que as medições quânticas não podem ser usadas para a emissão de sinais mais rápidos que a luz.

Esse resultado, obtido primeiramente pelo físico Philippe Eberhard, de Berkeley, generaliza a verificação de que é impossível, para o observador Verde, o envio de sinais reconhecíveis para o observador Azul, através de fótons geminados fortemente correlacionados. A prova de Eberhard estabelece que, mesmo no âmbito de uma realidade mais rápida que a luz, os resultados de quaisquer medições quânticas não podem ser conectados de modo mais rápi-

do que a luz.

A prova de Eberhard, ao contrário da de Bell, depende da validade da teoria quântica. Eberhard utiliza a teoria quântica para calcular o efeito de uma "medição quântica" (como a escolha de um movimento, pelo observador Verde) sobre outra "medição quântica" (como o padrão das marcas do observador Azul) efetuadas num sistema de fases embaralhadas, como um par de fótons no estado geminado. O cálculo de Eberhard mostra que, qualquer que seja o comportamento das marcas isoladas (por ser estritamente estatística, a teoria quântica não se preocupa com eventos isolados), o padrão das marcas não depende desses movimentos distantes. Os bits individuais da mensagem podem, concebível mente, se alterar mais rapidamente que a luz; como esses bits ocorrem aleatoriamente, não podemos provar que essa afirmativa é, ou não é, verdadeira. Porém, de acordo com Eberhard, o padrão desses bits per-

manece precisamente o mesmo, independentemente de como o detector é manipulado.

Uma "medição quântica" é, por definição, uma diferença estatisticamente discernível. Como não existe qualquer diferença estatística entre duas sequências aleatórias, as duas sequências aleatórias Azuis que podem resultar de dois movimentos diferentes efetuados pelo observador Verde não contam como duas medições quânticas. Desse modo, a prova de Eberhard permite que a natureza envie mensagens perfeitamente codificadas através de canais mais rápidos que a luz, mas veda o acesso dos seres humanos a esses canais, enquanto as suas ações forem limitadas pelas regras da teoria quântica.

Numerosos esquemas engenhosos têm sido delineados na tentativa de contornar a prova de Eberhard. Esses esquemas procuram, funda mental mente, explorar a ambiguidade existente no significado da "medição quântica", mas,

até hoje, todos têm falhado. Os cientistas mais céticos comparam a tentativa de construção de comunicadores mais rápidos que a luz baseados nas correlações quânticas fortes (em face da impossibilidade provada por Eberhard) às tentativas surgidas no século passado, visando à construção de máquinas de movimento perpétuo (em face da lei da conservação da energia).

A menos que surja uma abertura imprevista na pesquisa da comunicação mais rápida que a luz, a parcela minoritária da comunidade dos físicos que se interessam pela pesquisa da realidade se dividirá em duas facções: os que podem provar a existência de influências não-locais, mas não podem explorá-las, e os que não acreditam nas ligações mais rápidas que a luz, avalizadas por Bell, mas não podem refutá-las. Só o futuro dirá como será finalmente encerrada essa disputa que lavra no coração da física. Enquanto isso, vejamos como a descoberta de

Bell tem afetado a crise de realidade dos físicos. Qual foi a alteração que o teorema de Bell introduziu em nossa visão das oito realidades quânticas?

O TEOREMA DE BELL E A REALIDADE

Basicamente, Bell alterou nossa visão da realidade levantando a questão da não-localidade. Depois de Bell, qualquer modelo de realidade considerado sério precisa ser manifestamente não-local, ou feito sob medida para tornar sem sentido a distinção entre localidade e não-localidade. De um modo ou de outro, nessa era pós-Bell, todos os realistas quânticos precisam lidar com a não-localidade.

Realidade Quântica # 1: A interpretação de Copenhague, Parte I. (Não existe nenhuma realidade profunda.) Bohr acreditava que as entidades quânticas não possuem nenhum atribu-

to dinâmico próprio; esses atributos, que medimos como se fossem do quon, são uma produção conjunta deste e do instrumento M. Segundo a interpretação de Copenhague, os chamados atributos de um quon (excluídos os seus atributos estáticos) pertencem à "situação global de medição", e não propriamente ao quon.

O teorema de Bell nos diz que a percepção de Bohr, de que os atributos dinâmicos são criaturas da situação de medição, é essencialmente correta; a noção de que os atributos do quon são inatos deve ser abandonada por causa da sua ostensiva conotação local. Contudo, "a situação global de medição", que determina os atributos de um quon, é mais extensa do que Bohr poderia ter previsto. Como todos em seu tempo, Bohr acreditava firmemente na localidade. Porém, o teorema de Bell prova que "a situação global de medição", que decide sobre os valores dos atributos que o fóton Azul apresentará, precisa incluir a ajustagem do cristal

Verde, localizado, talvez, a uma distância de meia galáxia. Bohr fez mais do que sabia: o que acontece em sua "realidade do arco-íris" — um mundo de atributos relacionais — deve necessariamente depender não só dos observadores próximos mas, também, mais rapidamente que a luz, do "arranjo experimental global", não importa até quão longe este se estenda.

Realidade Quântica # 2: O mundo é criado no ato da observação. A noção de que os quons adquirem os seus atributos dinâmicos por intermédio do ato da observação é uma das pedras angulares da interpretação de Copenhague. O teorema de Bell meramente expande a noção de observador para incluir a ação de pessoas e aparelhos em locais arbitrariamente distantes — locais fora do alcance dos sinais convencionais, cujas velocidades estão limitadas pela velocidade da luz.

É importante entender que o teorema de

Bell exige que a realidade, e não os fenômenos, esteja unida por ligações mais rápidas que a luz. A mensuração é o meio pelo qual um físico faz contato com a realidade. Todas as medições quânticas são constituídas de saltos quânticos — os "altos" e "baixos" isolados de um determinado instrumento M, ou os clarões numa tela de fósforo, por exemplo. Os fenômenos quânticos consistem de padrões persistentes e repetitivos que esses quanta saltadores formam. Esses padrões estão destinados, pela prova de Eberhard, a serem locais, e somente assim foram até hoje observados. Por outro lado, os quanta — o alfabeto imprevisível em que são escritas as palavras e os parágrafos dos fenômenos deste mundo — devem necessariamente, segundo o teorema de John Bell, ser conectados de maneira não- local.

Realidade Quântica # 3: O mundo é um todo indiviso. A noção de que o mundo é um

todo inseparável surge da presença, na teoria quântica, do "embaralhamento de fases". No formalismo quântico, dois quons que, uma vez, agiram um sobre o outro, não se dividem em duas formas ondulatórias quando se afastam, mas passam, daí em diante, a ser representados por uma única onda. A questão que indaga se a essa "inteireza de representação" corresponde uma "inteireza de ser" foi levantada pelos físicos mais atentos, particularmente por Erwin Schrödinger e David Bohm.

Embora o embaralhamento de fases, mais rápido que a luz, seja necessário para produzir respostas corretas, essa condição nunca conduz a quaisquer resultados que possuem essa característica. Considerando que essas conexões instantâneas que ligam os quons separados, formando um todo indiviso (pelo menos no formalismo) nunca surgem no mundo dos fenômenos, muitos físicos veem- nos como aspectos puramente formais da linguagem quântica —

necessários aos cálculos, mas sem contrapartida na realidade.

O teorema de Bell mostra que a gramática holística do formalismo quântico reflete a natureza indivisível da própria realidade. Sob os fenômenos, o mundo é um todo sem linhas divisórias.

Embora aponte além dos fenômenos, o teorema de Bell é demonstrado por intermédio de argumentos tirados somente dos fatos. Devido à sua base estritamente fenomenal, o teorema de Bell em si não indica o mecanismo que a natureza utiliza para conseguir as suas necessárias conexões não-locais. Essas onipresentes conexões de fases do formalismo quântico oferecem uma imagem não- clássica de como um mundo não-local poderia funcionar: os quons são instantaneamente conectados, não porque algo se estira entre eles, mas porque cada um deles deixou no outro uma parte de si mesmo, à qual ele tem acesso imediato.

Realidade Quântica # 4: Interpretação dos mundos múltiplos. 0 teorema de Bell nada tem a dizer diretamente sobre a interpretação dos mundos múltiplos porque, no luxuriante universo de Everett, não se pode demonstrá-lo.

A sutil porém necessária pressuposição DCF (definibilidade contrafactual) admite como certo que, para um par de fótons da experiência EPR, uma ajustagem hipotética especial da calcita conduzirá a um resultado definido. No modelo de realidade dos mundos múltiplos, cada ajustagem de medição conduz a todos os resultados possíveis. O multiuniverso de Everett contraria a pressuposição DCF porque, embora um mundo como esse tenha contrafactualidade em abundância, falta-lhe definibilidade.

Embora o teorema de Bell não se aplique a um universo no estilo de Everett, mesmo sem ele esse universo conta com a presença de uma não-localidade suficiente. Qualquer modelo de

realidade, em que um insignificante evento ocorrido na galáxia de Andrômeda tem o poder de, instantaneamente, dividir a minha realidade em mil cópias xerox, não pode, mediante nenhum esforço da imaginação, ser chamado de "local".

Realidade Quântica # 5: A lógica quântica. (O mundo é montado como uma treliça não-booliana.) É preciso mais do que lógica para esclarecer os fatos quânticos. A lógica quântica, como a sua contraparente booliana, apenas codifica o esqueleto de uma conversa sobre os atributos quânticos. Ela não fornece um quadro quantitativo completo dos fenômenos quânticos, mas apenas um simples arcabouço lógico que precisa ser completado com relações quantitativas mais específicas.

A prova de Bell não pode derivar de argumentos qualitativos porque, para sua validação, necessita de relações numéricas específicas. A

Fig. 12.5 ilustra o quanto é pequena a diferença experimental que separa uma realidade não-local da sua competidora local. As relações lógicas quânticas meramente delineiam os fenômenos, e não fornecem informações quantitativas. O teorema de Bell não pode ser demonstrado com base somente em treliças lógicas.

Já foi sugerido que, embora não possamos provar o teorema de Bell através da lógica quântica, talvez possamos negá-lo. Para demonstrar o teorema de Bell, torna-se necessário recorrer à lógica booliana comum; se a lógica do mundo for outra, talvez essa demonstração não consiga sobreviver. Contudo, até mesmo os lógicos quânticos utilizam a lógica booliana quando se trata de conversar sobre a lógica quântica. Em outras palavras, a metalógica da lógica quântica é booliana.

Além disso, a lógica quântica é consequência de uma pressuposição especial a respeito dos atributos de um quon. Se admitirmos que

os fótons possuem atributos próprios, esses atributos deverão obedecer a uma aritmética não booliana. Por outro lado, se admitirmos que os atributos de um fóton são relacionais, necessitaremos apenas de uma lógica comum. Considerando que a versão do teorema de Bell apresentada aqui não faz qualquer pressuposição relativa aos atributos dos fótons, o conceito de lógica quântica é irrelevante.

Do mesmo modo, o teorema de Bell não proporcionou qualquer percepção nova do significado das relações não boolianas. De todas as realidades quânticas, a lógica quântica parece ser a que foi menos esclarecida pela necessidade lógica de conexões não-locais, expressa por Bell.

Realidade Quântica # 6: Neorrealismo. (O mundo é constituído de objetos comuns.) A prova de von Neumann proíbe os objetos com atributos inatos. O teorema de Bell também

proíbe esses objetos comuns e, além disso, rejeita todas as entidades cujos atributos relacionais dependem somente das ajustagens de instrumentos M locais. Se essas provas são válidas, os únicos tipos de entidades que podem formar o mundo quântico são aqueles cujos atributos dependem, de maneira não-local, das ajustagens de instrumentos de medida distantes.

A maioria dos modelos neorrealistas está baseada na suposição de que o mundo é feito, à maneira clássica antiga, de partículas e campos. Os modelos de realidade quântica, construídos segundo esse plano, possuem a estranha característica de que os campos que conectam cada partícula ao seu meio circundante parecem ser capazes de inverter instantaneamente os atributos de uma partícula, em resposta a uma alteração de configuração ocorrida em qualquer parte do universo.

Esses modelos do mundo, do gênero partí-

cula/campo, não podem ser do tipo não-mediato, porque as alterações dos atributos das partículas são transmitidas por um campo (não saltam misteriosamente de um ponto para outro). Contudo, esse campo — denominado onda piloto — precisa ser capaz de transmitir as informações mais rapidamente do que a luz, e sem perda de intensidade. Desse modo, embora sejam intermediados pelas ondas piloto, esses mundos neorrealistas são não-atenuados e instantâneos.

Para os físicos, a característica mais desagradável dos modelos neorrealistas é a presença de campos reais que se movem mais depressa que a luz. O teorema de Bell mostra que o aparecimento, nos esquemas neorrealistas, de campos capazes de transmitir dados a uma velocidade superior à da luz não é acidental: qualquer modelo de realidade compatível com os fatos quânticos precisa possuir algum meio de permutar informações mais rapidamente que a

luz.

Determinados inimigos das conexões mais rápidas que a luz não sabem dizer qual é a opção mais repugnante: os campos reais dos neorrealistas, que, explicitamente, transportam sinais de um lugar para outro com velocidades superiores à da luz, ou as influências do tipo vodu, não-mediatas, sugeridas pelo formalismo quântico, que simplesmente saltam diretamente da Terra para Betelgeuse.

Realidade Quântica # 7: A consciência cria a realidade. O teorema de Bell diz que, se a consciência cria a realidade, ela não pode ser tratada como um assunto puramente local. A decisão de uma mente aqui deve necessariamente ser capaz de alterar um atributo lá, onde "aqui” e "lá" podem estar separados por uma distância imensa.

As conclusões precipitadas de que essas conexões quânticas fortes permitem a telepatia ou

os efeitos da mente sobre a matéria devem ser equilibradas pela percepção de que o teorema de Bell diz respeito somente à realidade — isto é, aos saltos quânticos puros — e não aos fenômenos, que consistem de padrões regulares de saltos quânticos. Assim, mesmo que a consciência possa criar a realidade, o poder da mente para intervir em acontecimentos distantes talvez esteja limitado à produção de eventos isolados, estatisticamente incomuns — os chamados "glitches" (acontecimentos atípicos e repentinos) que surgem de tempos em tempos nas experiências, mesmo naquelas mais rigidamente controladas.

As mentes distantes podem alterar a textura da realidade mas não a sua padronagem, o que não implica necessariamente em que as mentes estão restritas a feitos triviais. Alguns físicos acreditam que todo o universo físico foi originado do nada, num único salto quântico — exatamente o tipo de evento quântico selvagem,

imprevisivelmente singular, que uma mente podería deflagrar sem derrubar a pilha de maçãs da estatística.

Realidade Quântica # 8: 0 mundo duplo. Werner Heisenberg foi um dos poucos físicos quânticos que tentou imaginar como seria a realidade quântica não medida. Segundo Heisenberg, o mundo sem instrumentos de medida não é inteiramente real, mas consiste de uma superposição — um estilo quântico de coexistência particularmente íntima — de "tendências a ser" semirreais que ele chamou de *potentia*. A vantagem desse estilo atenuado de ser reside em que numerosas tendências contraditórias podem coexistir — uma opção não acessível aos fatos concretos; o preço da não-contradição é o de que nenhuma dessas tendências é inteiramente "real". No ato da medição, mas não antes disso, uma dessas tendências é tirada do rebanho, aparentemente ao acaso, e agraciada com

o pleno status de realidade. A essência da medição, no mundo duplo de Heisenberg, é a súbita transformação da *potentia* em realidade.

O teorema de Bell exige que essa transição, induzida pela medição, entre a possibilidade formal e a realidade concreta não seja local, e sim que dependa de outras medições em curso em lugares arbitrariamente distantes.

O modelo de Heisenberg constitui uma versão incomumente explícita da realidade criada pelo observador. Ao contrário de outros defensores da realidade criada pelo observador, ele tenta formar uma imagem do que é a realidade, antes da observação. Heisenberg declara que a matéria-prima do universo é a *potentia* (tendência, possibilidade), ou seja: um mundo fundamentado numa onda de oportunidade. O teorema de Bell, aplicado ao quadro proposto por Heisenberg, exige que essas oportunidades oscilantes sejam interligadas mais rapidamente que a luz.

Essa breve recapitulação das oito realidades quânticas à luz da prova de Bell mostra que o teorema de Bell não soluciona a questão da realidade quântica em favor de uma ou outra realidade. Enquanto derem lugar a uma característica não-local, as oito serão viáveis como modelo para "a real maneira de ser do universo".

O que o teorema de Bell efetivamente traz para a questão da realidade quântica é a especificação clara de urda das características necessárias à realidade profunda: qualquer que seja a realidade, ela precisa ser não-local. Desde a verificação experimental do teorema de Bell, feita por Clauser, sabemos que qualquer modelo correto de realidade terá que incorporar conexões não-locais explícitas. Nenhuma realidade local pode explicar o tipo de mundo em que vivemos.

Além disso, considerando-se que o resultado de Bell está baseado em fatos experimen-

tais, ele não depende da validade da teoria quântica. Se algum dia a teoria quântica falhar em suas previsões, ou for simplesmente substituída por uma outra maneira diferente de prever os mesmos fatos quânticos, o teorema de Bell continuará válido. Embora o teorema de Bell seja citado nas disputas sobre a totalidade da teoria quântica, ele deriva dos próprios fatos, e não de alguma representação teórica especial desses fatos.

O teorema de Bell veio iluminar uma faceta da realidade profunda, mas a crise de realidade na física está longe de ser encerrada; nenhum físico pode, ainda, dizer o tipo de mundo em que nos é dado viver. Especularemos, em seguida, sobre alguns rumos que a busca da realidade quântica poderá tomar.

É POSSIVEL CONSTRUIR UM MODELO HOLISTICO EXPLÍCITO DA MENSURAÇÃO?

Uma das mais artificiosas características da teoria quântica é a divisão do mundo em duas partes: o sistema e o instrumento M. O formalismo quântico indica que o mundo é um todo sem linhas divisórias, e, no entanto, o primeiro passo de qualquer computação quântica é o rompimento dessa unidade.

Na interpretação toda quântica da medição, uma cadeia de von Neumann se estende do sistema ao observador, e o problema da medição consiste em saber onde "romper" essa cadeia. À luz da inteireza quântica, a representação da medição por uma cadeia linear, com início e fim definidos, não parece ser um bom começo. Talvez a cadeia de von Neumann, ao invés de ser rompida, devesse ter os seus elos soldados para formar o que poderíamos chamar de anel de von Neumann.

Num esquema como esse (reconhecidamente vago), o instrumento de medida proporcionaria um contexto para os atributos do sis-

tema quântico e, simultaneamente, os sistemas quânticos constituintes proporcionariam um contexto para os atributos do instrumento M. Cada entidade quântica mediria a outra, fechando o círculo e realizando um modelo consistente e fechado do processo da medição.

A ideia de sistemas medindo-se uns aos outros implica na existência de realidades autônomas, sem necessidade de observadores humanos. Em um mundo constituído de comunidades de círculos de medição que se investigam reciprocamente, poucos quons não fariam parte de pelo menos uma dessas comunidades. Mesmo as entidades que tivessem cessado de agir recíproca e convencionalmente com suas companheiras, estariam envolvidas em um ou mais anéis de von Neumann, através do embaralhamento não-local de fases.

Essa realidade hipotética, feita de anéis de von Neumann, leva ao extremo a visão de Bohr: ela é inteiramente relacionai, não conten-

do qualquer tipo de entidade privilegiada; um mundo totalmente destituído de coisas, cheio de quons semelhantes a arco-íris constituídos, eles próprios, por arco-íris.

Outra direção possível para a pesquisa da realidade seria a efetiva exploração dos mundos múltiplos sugeridos pela interpretação da teoria quântica, proposta por Everett.

De acordo com Kant, os homens não podem experimentar a realidade porque os seus sentidos e cérebros foram desenvolvidos para a consecução de finalidades mais mundanas. Por exemplo, uma das maiores lições da teoria especial da relatividade de Einstein é a de que o mundo é, na realidade, tetradimensional. Apesar de que os homens experimentam um mundo tridimensional, em que o tempo parece fluir, a realidade em si existe no espaço-tempo — onde o tempo é uma dimensão, no mesmo nível do espaço. Hermann Minkowski, companheiro de Einstein, assim introduzia a estrutura tetra-

dimensional do mundo para os seus alunos:

"As ideias de espaço e tempo que desejo expor para vocês nasceram do solo da física experimental, e é nisso que reside a sua força Elas são radicais. Daqui por diante, o espaço e o tempo por si sós estão fadados a desaparecerem gradualmente, transformando-se em sombras, e somente uma espécie de união dos dois preservará uma realidade independente."

Se o tempo não é mais do que uma outra dimensão, a inteira história do universo, do início ao fim, se estende ao longo dessa linha do tempo. O passado ainda existe, e o mesmo acontece com o futuro. A nossa percepção de um presente eterno que parece caminhar na direção do futuro é uma ilusão; não é esse, absolutamente, o modo de ser do mundo. O físico Hermann Weil assim expressou a visão tetradimensional das coisas: "0 mundo objetivo simplesmente é; ele não acontece.”

Com que direito os físicos negam a sua ex-

periência imediata para afirmarem que o mundo é realmente tetradimensional? A resposta é simplesmente a seguinte: se não escreverem as equações da física em quatro dimensões (e, ao contrário, escreverem-nas em três dimensões de espaço mais uma dimensão variável de tempo), obterão respostas compatíveis com a experiência de observadores imóveis, mas não com as de observadores que se deslocam em relação a eles. Para descrever com precisão os fenômenos elétricos e mecânicos, de maneira válida para todos os observadores, os físicos precisam ver o mundo no espaço-tempo, e não no espaço + tempo.

Do mesmo modo, na teoria quântica, os físicos precisam descrever o mundo não medido como uma superposição simultânea de todas as possibilidades. Se deixarem fora uma só possibilidade, obterão a resposta errada. Contudo, não experimentamos o mundo como uma superposição de possibilidades, mas somente co-

mo uma sequência de realidades definidas, uma de cada vez. Mais uma vez, a percepção humana das coisas parece estar fora de passo com a realidade.

Por mais requintados que sejam os nossos conceitos, não podemos, segundo Kant, evitar de perceber o mundo senão através de filtros especificamente humanos. Ainda que quiséssemos, não poderíamos arrancar nossos óculos coloridos e olhar o mundo como ele é realmente. Nesse espírito kantiano, Heisenberg explica como os fenômenos inevitavelmente parecem clássicos para os homens (efeito Cinderela), a despeito dos indícios da física de que a realidade em si poderá ser tudo, menos clássica:

"Qualquer experiência física, quer se refira aos fenômenos da vida de todo dia, quer se refira aos eventos atômicos, deverá ser descrita nos termos da física clássica. Os conceitos da física clássica foram a linguagem em que descrevemos o arranjo de nossas experiências e relata-

mos os resultados obtidos. Não podemos, nem devemos, substituir esses conceitos por quaisquer outros... O uso dos conceitos clássicos é, afinal, uma consequências do modo humano geral de pensar... É inútil discutir o que poderia ser feito, se fôssemos outros seres diferentes do que somos."

A fonte de todos os paradoxos quânticos parece estar no fato de que as percepções humanas criam um mundo de realidades singulares — nossa experiência é inevitavelmente "clássica" — enquanto que a realidade quântica simplesmente não é assim. A realidade quântica consiste de possibilidades simultâneas, um "poli-histórico" modo de ser, absolutamente incompatível com as nossas mentes que seguem uma só trilha.

Se esses universos alternativos forem reais e estivermos impedidos de experimentá-los somente por causa de um acidente biológico, talvez possamos estender mecanicamente os nos-

sos sentidos — como já fizemos em tantos outros casos — com uma espécie de microscópio quântico que nos permita experimentar efetivamente, em primeira mão, alguns dos universos paralelos de Everett. Se a física assegura que nossas vidas estão mergulhadas em um mundo inteiramente quântico, por que deveria ser óbvio que nossas experiências devam permanecer para sempre clássicas?

É A CONSCIÊNCIA UMA FORMA DE CONHECIMENTO QUÂNTICO?

Embora pareça ser verdade que toda experiência física é clássica na forma é não no conteúdo, é assim tão óbvio que toda a gama de conhecimentos humanos deva também ser absolutamente clássica?

O maior mistério da natureza é a consciência. Não se trata de possuirmos teorias ruins ou imperfeitas do conhecimento perceptivo huma-

no; simplesmente não possuímos qualquer teoria sobre esse assunto. Quase tudo o que sabemos a respeito da consciência é que ela tem mais a ver com a cabeça do que com o pé. Não é muito, mas é mais do que sabiam os antigos egípcios: eles jogavam fora o cérebro antes de começarem o intrincado processo de embalsamar os corpos, por considerá-lo um mero acessório.

Será possível que a consciência seja alguma forma de efeito quântico? Será a percepção humana um modo privilegiado de acesso ao "interior" do mundo quântico, uma porta aberta para algum domínio de possibilidades do quon, que se estende ao cérebro? Poderemos saber, em primeira mão, como é a vida no mundo quântico, simplesmente permanecendo sentados, olhando para o interior de nossas cabeças?

A experiência mental humana parece pertencer a dois tipos: uma experiência de fatos, lembranças, emoções, estados do corpo — uma

forma inteiramente clássica de adquirir conhecimento, que poderíamos chamar de "consciência computacional", que se forma sobre um fundo de "percepção crua" — e aquela misteriosa e, ainda assim, familiar sensação que abandonamos quando vamos dormir e para a qual retornamos a cada manhã. Esse segundo tipo de experiência já foi chamada de "consciência sem objeto". Eu a chamo de "consciência comum", e acredito que ela seja uma qualidade humana que nos distingue dos computadores — pelo menos dos computadores como são atualmente constituídos.

Se admitirmos que a percepção comum constitui uma conexão direta com a realidade quântica, assim como o nosso conhecimento "externo" das entidades quânticas pode ser caracterizado pela expressão "ignorância quântica", poderemos, igualmente, chamar essa experiência direta interna, da verdadeira natureza do mundo, de "conhecimento quântico". Uma das

mais importantes realizações científicas imaginárias seria a descoberta de uma relação explícita entre o alfabeto de formas ondulatórias da teoria quântica e determinados estados humanos de consciência.

O teorema de Bell mostra que, embora os fenômenos do mundo pareçam ser estritamente locais, a realidade sob a superfície fenomenal deve necessariamente ser mais rápida que a luz. A realidade profunda do mundo é conservada mediante uma conexão quântica invisível cuja influência onipresente é não-mediata, não-atenuável e instantânea. Descartados os rumores não confirmados de telepatia e outros supostos poderes da mente, a nossa "consciência computacional" básica parece ser tão local quanto qualquer outro fenômeno clássico. Mas, se a percepção comum for uma manifestação privada da realidade quântica profunda, o teorema de Bell exigirá que nosso conhecimento quântico seja não-local, ligado instantaneamente a

tudo em que tenha previamente tocado. Como esse tipo de percepção consiste de consciência sem conteúdo, é difícil ver o uso que podemos fazer dessas conexões não-locais. Por outro lado, talvez essas conexões não se destinem ao nosso "uso".

As religiões afirmam que somos todos irmãos e irmãs, filhos da mesma divindade; os biologistas dizem que estamos entrelaçados a todas as formas de vida deste planeta; nossa sorte se eleva ou cai juntamente com a delas. Os físicos agora descobrem que os próprios átomos de nossos corpos são dispostos a partir de uma textura comum, mais rápida que a luz. Não é só meramente na física que os homens estão sem contato com a realidade; ignoramos essas conexões com risco para nós. Albert Einstein, que buscou a realidade durante toda a sua vida, teve, para dizer, com respeito à ilusão do isolamento, as seguintes palavras:

"Um ser humano é parte do todo que cha-

mamos de 'Universo'; uma parte limitada no tempo e no espaço. Ele experimenta a si mesmo, seus pensamentos e sensações, como algo separado do resto — uma espécie de ilusão de ótica da sua consciência. Essa ilusão é, para nós, uma prisão que nos deixa restritos aos nossos desejos pessoais e à nossa afeição por umas poucas pessoas mais próximas de nós. Nossa tarefa deverá ser a de nos livrarmos dessa prisão, ampliando o nosso círculo de compaixão a fim de abraçar todas as criaturas vivas e toda a natureza em sua beleza. Ninguém é capaz de alcançar completamente esse estado, mas o esforço nesse sentido é, em si, uma parte da liberação e uma base para a segurança interior."

APÊNDICE I

LEITURAS SUPLEMENTARES SOBRE A REALIDADE QUÂNTICA

A seguinte relação de livros e artigos sobre a questão da realidade quântica não pretende ser completa, mas representa o material que me foi útil para a formação de um sentido nessa área.

REFERÊNCIA GERAL

1. Foundations of Quantum Mechanics: Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi" Course 49, Bernard d'Espagnat ed. New York: Academic Press (1971).
2. *The Phi/osophy of Quantum Mechanics,* Max Jammer. New York: Wiley (1974).

3. CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS (SECOND EDITION), Bernard d'Espagnat. Reading, Mass.:W. A.. Benjamin (1976).
4. *Quantum Theory and Measurement,* John Archibald Wheeler & Wojciech Huberr Zurck eds. Princeton,N.J.: Princeton University Press (1983).

Estes quatro livros constituem uma leitura essencial para aqueles que pesquisam seriamente a realidade. A Referência # 1 é o registro de um curso de verão sobre os fundamentos quânticos; a Referência # 2 é uma revisão histórica detalhada da questão da realidade quântica. 0 livro de d'Espagnat é o que mais se aproxima de um livro didático nessa área. A Referência # 4 é uma coleção de importantes artigos sobre a pesquisa da realidade quântica; os artigos citados aqui e que foram reproduzidos na coleção Wheeler-Zurek estão marcados com um asterisco.

5. *Atomic Physics and Human Knowledge,* Niels Bohr. New York: Wiley (1963).
6. "The Copenhagen Interpretation," Henry Stapp. *American Journal of Physics 40* 1098 (1972).
7. "Law Without Law" (*), John Archibald Wheeler (ver Wheeler & Zurek, Ref. #4, p. 182).
8. *Wholeness and the Implícate Order,* David Bohm. London: Routledge and Kegan Paul (1980).
9. *The Many-Worids Interpretatíon of Quantum Mechanics,* Bryce DeWitt & R. Neill Graham. Princeton, N.J.: Princeton University Press (1973).
10. 'The Logic of Quantum Physics/' David Finkelstein. *Transactions of the NY Academiy o f Sciences 25* # 6 621 (1965).

11. "Quantum Logic/' Carl G. Adler & James F. With. *American Journal of Physics 51* 412 (1983).
12. "Remarks on the Mind-body Question" (*) in *The Scientist Specuiates,* I. J. Good, Ed.; New York: Basic Books (1962).
13. "Mind, Matter and Quantum Mechanics," Henry P. Stapp *Foundations of Physics 12* 363 (1982).
14. *A Survey of Hidden-Variables Theories,* Frederik, J. Belinfante. Oxford: Pergamon Press (1973).
15. "Measurement Understood through the Quantum Potential Approach," David Bohm and Basil Hiley. *Foundations of Physics 14* 255 (1984).
16. *Physics and Phiiosophy,* Werner Heisenberg. New York: Harper & Brothers (1958).

Estas são as melhores referências que posso recomendar sobre as oito realidades quânticas descritas no texto.

LIVROS DIDÁTICOS DE INTERESSE ESPECIAL

17. *Mathematicai Foundation of Quantum Mechanics* (English translation by R. T. Beyer), John von Neumann. Princeton, N.J.: Princeton (1955).
18. *Quantum Theory,* David Bohm. New York: Prentice-Hall (1951).
19. *The Feynman Lectures on Physics: Volume III,* Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands. Reading, Mass.: Addison-Wesley (1965).
20. *Quantum Mechanics and Pa th Integrais,* R. P. Feynman and A. R. Hibbs. New York: McGraw-HilI (1965).

A Referência # 17 é a "bíblia quântica", de von Neumann — a estrutura matemática que sustenta, até hoje, a teoria quântica. O livro didático de Bohm é uma apresentação clara da teoria

quântica, do ponto de vista de Copenhague, escrita antes de sua deserção para o campo neo-realista. A Referência # 19 constitui uma introdução, excepcionalmente lúcida, a essa teoria. Na Referência # 20, Feynman faz uma descrição consideravelmente detalhada da sua abordagem da adição de histórias.
"Can Quantum-mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" (*), Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen. *PhysícaI Review 47111* (1935).
21. "Can Quantum-mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" (#), Niels Bohr. *Physical Review 48* 696 (1935).
22. "On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics" (*), John S. Bell. *Reviews of Modem Physics 38* 447 (1966).
23. "On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox" (*), John S. Bell. *Physics 1* 195(1964).
24. "BelTs Theorem: Experimental Tests and Implications," John F. Clauser and Abner Shi-

mony. *Reports on Progress in Physics 41* 1881 (1978).
25. "Experimental Test of BelTs Inequalities Using Time-varying Analyzers," Alain Aspect, Jean Dalibard, Gerard Roger. *Physical Review Letters 49* 1804 (1982).
A Referência # 21 é o artigo EPR original e a # 22 é a resposta de Bohr. A Referência # 23 é a análise definitiva da prova de von Neumann, feita por Bell, e sua antevisão do teorema de Bell. A Referência # 24 é a formulação original do famoso teorema de Bell. O artigo de Clauser-Shimony é uma revisão recente do status experimental do teorema de Bell. A última publicação é uma descrição da verificação do teorema de Bell, feita por Aspect, utilizando comutadores de polarização ultra-rápidos.

TÓPICOS ESPECIAIS

26. *The Ethereal Aether,* Loyd S. Swenson, Jr.

Austin: University of Texas (1972).
27. *Molecular Reality,* Mary Jo Nye. New York: American Elsevier (1972).
28. *The Intensity Interfero meter,* Robert Hanbury Brown, New York: Halsted Press (1974).
29. "Quantum Non-Demolition Measurements" (*), V. B. Braginski, Y. I. Vorontsov, K. S. Thorne, *Science 209* 547 (1980).
30. "Squeezed States of Light," D. F. Walls *Nature 306* 141 (1983).
As duas primeiras referências constituem a crônica da ascensão e queda do éter luminífero e a elevação da hipótese atômica a um indubitável status de realidade. Os demais artigos fornecem mais detalhes sobre as larguras de faixa das ondas mandatárias do fóton e sobre os atributos quânticos incomuns que são o objeto das chamadas medições QND.
31. "FLASH — A Superluminal Communicator Based upon a New Kind of Quantum Measurement," Nick Herbert. *Foundations of Phy-*

sics, 12 1171 (1982).
32. "BelTs Theorem and the Different Concepts of Locality," Philippe Eberhard. *Nuovo Cimento 46B* 392 (1978).
33. "A Single Quantum Cannot be Cloned," W. K. Wooters and W. H. Zurek. *Nature 299* 802 (1982).
34. "Is a Photon Amplifier Always Polarization Dependent?" L. Mandei. *Nature 304* 188(1983).

A Referência # 32 é uma proposta típica visando ao uso da conectibilidade quântica na sinalização mais rápida que a luz. A Referência # 33 contém a prova de Eberhard, de que tais propostas devem fracassar, caso a teoria quântica esteja correta e seja completa. As Referências # 34 e # 35 suprem a refutação detalhada desse esquema especial de sinalização.

DIVULGAÇÕES POPULARES DA PESQUISA DA REALIDADE QUÂNTICA

35. *The Tao of Physics,* Frijot Capra. Berkeley, Calif.: Shambhala (1975).
36. *Fabric of the Universe,* Denis Postle. New York: Crown (1976).
37. *The Dancing Wu Li Masters,* Gary Zukav. New York: MorrOw (1979).
38. *Other Worlds,* Paul Davies. New York: Simon & Schuster (1980).
39. *Taking the Quantum Leap,* Fred Alan Wolf. New York: Harper & Row (1981).
40. *The Cosmic Code,* Heinz R. Pageis, Simon & Schuster (1982).
41. *tn Search of Reaiity,* Bernard d'Espagnat. Berlin, West Germany. Sprin- ger-Verlag (1983).
42. *The Quantum World,* J. C. Polkinghorne. Harlow, Essex, England: Longman (1984).
43. *In Search of Schrodinger's Cat,* John Gribbin. New York: Bantam (1984).
Estas apresentações da questão da realidade

quântica ilustram os pontos de vista divergentes e contraditórios dos físicos (e seus intérpretes) referentes à natureza da realidade profunda. É de especial interesse o "mercado de realidades", de Pageis, na Referência #41.
44. "Quantum Mechanics and Reality/' Bryce. DeWitt, *Physics Today 23* p. 30 September (1970).
45. "Quantum Theory and Reality/' Bernard d'Espagnat. *Scientific American 241* p. 158 November (1979).
46. "Ghostly Interactions in Physics/' Basil Hiley. *NewScientist* p. 746 March6 (1980).
47. "Physicists Redefine Reality." London *Economist* p. 95 September 26 (1981).
48. "Quantum Mysteries for Everyone," N. David Mermin. *Journal of Phi- losophy 78* 397 (1981).
49. "Quantum Weirdness," Martin Gardner. *Discover 3* # 10 69 (1982).
50. "Quantum Mechanics Passes Another

Test/' Arthur L. Robinson. *Science 217*435 (1982).
51. “Loophole Closed in Quantum Mechanics Test," Arthur L. Robinson. *Science 219 W* (1983).
52. “Facing Quantum Mechanical Reality," Fritz Rohrlich. *Science 221* 1251 (1983).

Estes artigos visam principalmente a beneficiar os cientistas que trabalham em outras áreas que não a pesquisa da realidade quântica, e ao público em geral. O relatório sobre a redefinição da realidade pelos cientistas (Referência # 48), publicado pelo *Economist*, de Londres, parece não ter produzido qualquer impacto sobre a realidade financeira do mundo.

A EXPERIÊNCIA DIRETA

53. *Reality and Empathy,* Alex Comfort, Albany: State University of New York (1984).

54. *The Sex Sphere,* Rudy Rucker. New York: Ace Science Fiction (1983).
55. *Mr. Tompkins in Paperback,* George Gamow. Cambridge, England: Cambridge University Press (1965).
56. *Cosmicomics,* ítalo Calvino. New York: Harcourt, Brace & World (1968).
57. *AH the Myriad Ways,* Larry Niven, New York: Ballantine (1971).
58. *BeiTs Book,* Helen Luster. Fur Line Press (1976): pedidos para Manroot Books, Box 982, South San Francisco, CA 94080.
59. *Schrödinger's Cat,* Robert Anton Wilson. New York: Pocket Books (1981).
60. *Superluminaf,* Vonda Mclntyre. Boston: Houghton Mifflin (1983).

Penetrando nos mistérios da experiência de todo dia, Alex *(Joy* OF SEX) Comfort entrevista o demônio "Gezumpstein", que pode perceber o mundo “como ele é realmente". Uma demonete semelhan-

te, criada por Rudy Rucker, se autodenomina "Babsi".

No mundo do Sr. Tompkins, os novos valores atribuídos às constantes físicas tornam os efeitos quânticos, e os da relatividade, parte da vida cotidiana. Estou certo de que o Professor Gamow entendia que esses mundos imaginários deveriam ser vistos com uma pitada de desconfiança, e não como imagens sérias da realidade quântica. *Cosmicomics* explora a aparência que teria o cosmo centrado na consciência, quando visto de dentro. A estória de Niven descreve algumas inesperadas consequências psicológicas da realidade dos mundos múltiplos. Utilizando o devaneio poético como sonda, *Bell's Book,* de Luster, testa a nossa rede de segurança linguística para conexões irregulares. Várias realidades quânticas formam o pano de fundo para o espetáculo inesperado e extravagante de Wilson. Em *Superluminal,* de McIntyre, a realização de viagens mais rápidas que a luz abre novas possibilidades para a humanidade no espaço-tempo.

APÊNDICE II

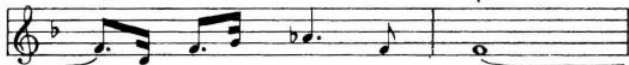
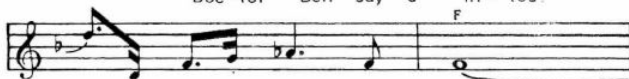
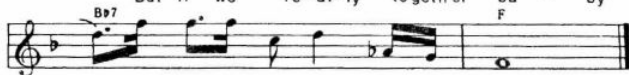
Um Número Quântico

B E L L S   T H E O R E M   B L U E S

Letra: Nick Herbert

Música: Blues tradicional.

(Number Twelve Traln)

(Doutor Bell diz que nós 'tamos conectados./Ele me chama no telefone./Doutor Bell diz ligados./Ele me chama no telefone./ Mas se nôs tamos realmente juntos, baby por que é que me sinto tão solitário?)

F
Doc-tor Bell say we con-nec-ted.
B♭7
F
He call me on the phone.
F7
B♭7
Doc-tor Bell say u-ni-ted.
F
He call me on the phone.
C7
But if we re-al-ly together ba-by
B♭7
F
How come I feel so all a-lone?